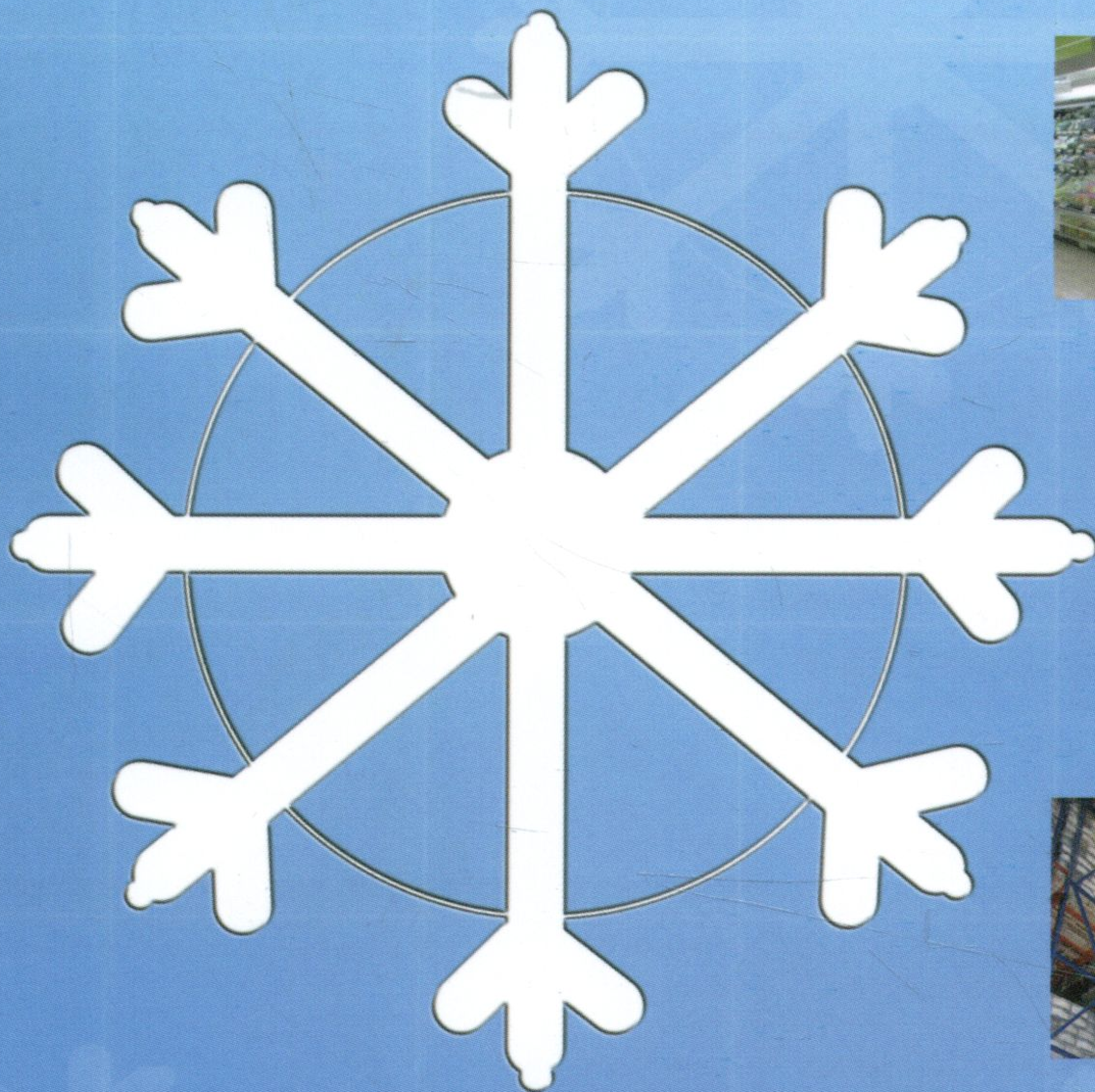
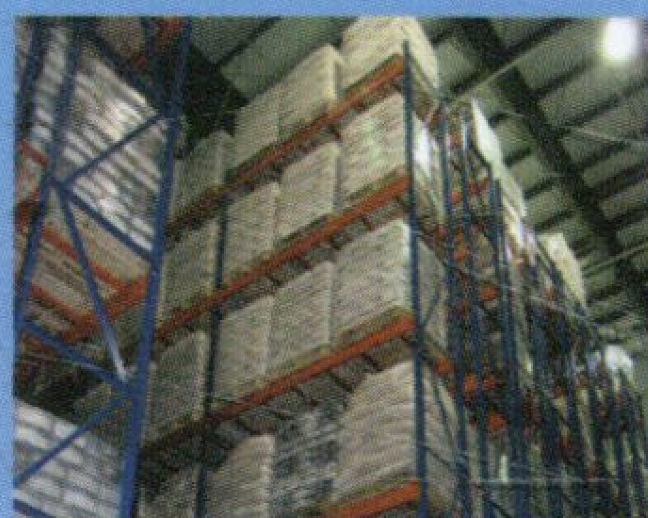
مخـــازن التبريـــد



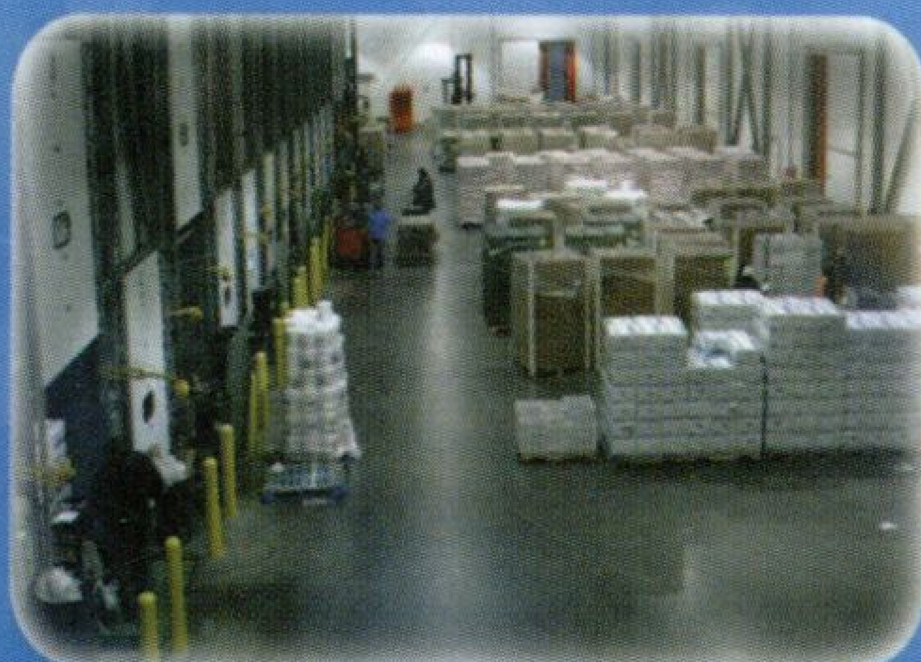






أ. د. مصطفى محمد السيد   أ. د. عمر محمد علي الرابغي

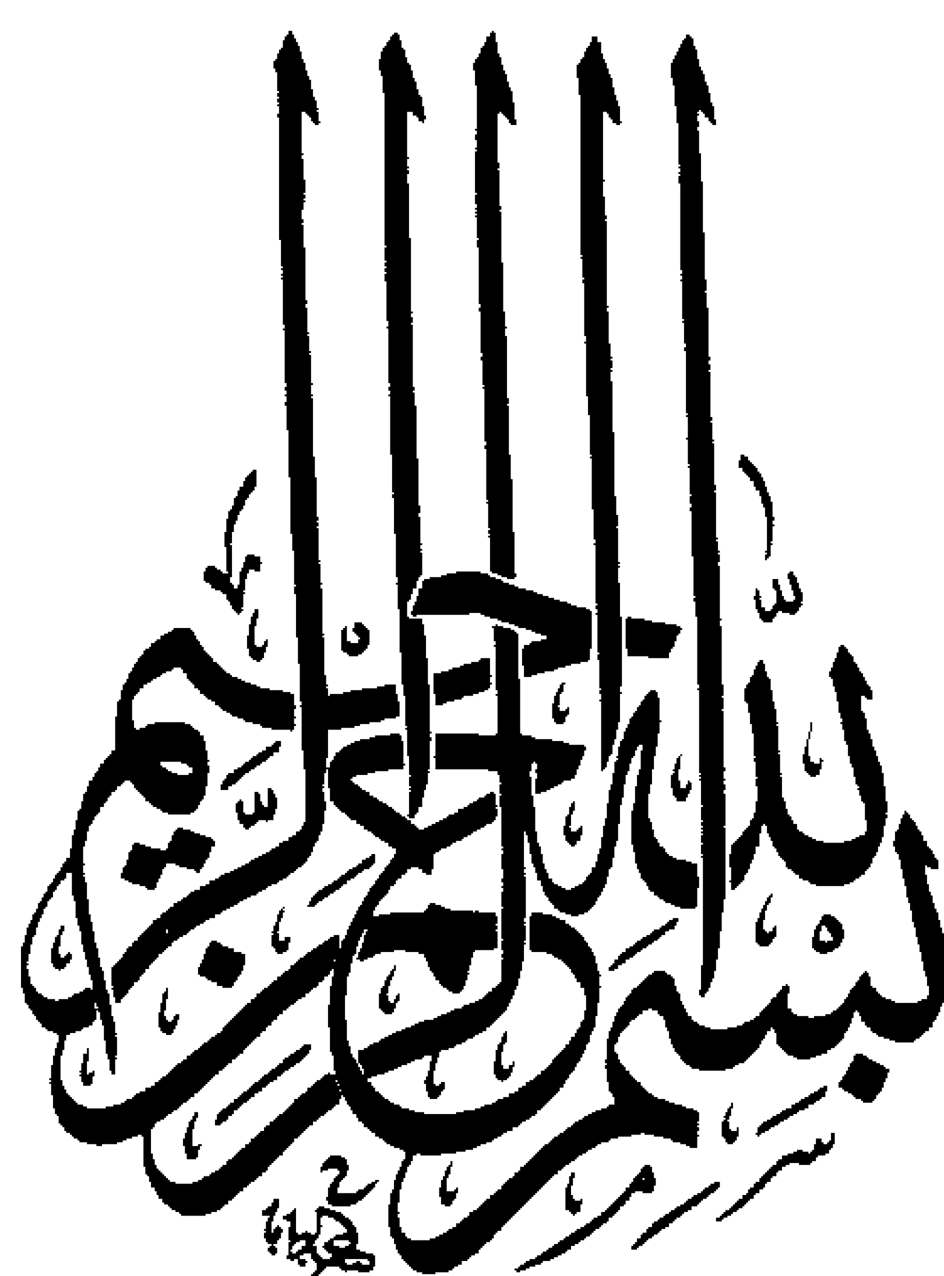




مركز النشر العلمي
جامعة الملك عبد العزيز
http://spc.kau.edu.sa






بسم الله الرحمن الرحيم

مخازن التبريد

أ. د. مصطفى محمد السيد　　أ. د. عمر محمد علي الرابغي

المجموعة المصرية للاستشارات الهندسية　　كلية الهندسة - جامعة الملك عبد العزيز

مركز النشر العلمي
جامعة الملك عبد العزيز
ص ب : ٨٠٢٠٠ - جدة : ٢١٥٨٩
المملكة العربية السعودية
http://spc.kau.edu.sa

الطبعة الأولى: ١٤٣٢هـ (٢٠١١م)

فهرسة مكتبة الملك فهد الوطنية أثناء النشر

السيد ، مصطفى محمد

مخازن التبريد./ مصطفى محمد السيد ؛ عمر محمد علي الرابغي. — جدة، ١٤٣٢هـ

٤٥١ ص ؛ .. سم

ردمك: ٩٧٨-٩٩٦٠-٠٦-٦٠٤-٢

١- الاغذية — حفظ ٢- هندسة التبريد أ. الرابغي ، عمر محمد علي (مؤلف مشارك) ب. العنوان

ديوي ٦٤١,٤ ١٤٣٢/١٠٧١١

رقم الإيداع: ١٤٣٢/١٠٧١١

ردمك: ٩٧٨-٩٩٦٠-٠٦-٦٠٤-٢

مطابع جامعة الملك عبدالعزيز

شكر و تقدير

يتقدم المؤلفان بالشكر والثناء لله عز وجل أن تم هذا الكتاب على الوضع الحالي، كما يشكران عائلتيهما و كل من له حق عليهما.

ولا ينسى المؤلفان شكر جامعة الملك عبدالعزيز بجدة على تشجيعها على التأليف والنشر العلمي، إضافة لشكر السادة المحكمين على ملاحظاتهم القيمة، سائلين الله عز وجل أن يكون هذا الكتاب مفيدا.

تقديم

تعتبر مخازن التبريد واحدة من أهم التطبيقات الخاصة بهندسة التبريد، ويقصد بمخازن التبريد الثلاجات الكبيرة لحفظ الأطعمة والمواد الغذائية والمواد التي يخشى من تلفها نتيجة للتفاعلات البيولوجية بهذه المواد، وهي بالتأكيد أحد الدعائم المهمة للحضارة المعاصرة وركيزة من ركائز الاقتصاد لأي دولة.

ويهدف الكتاب إلى إمداد المهندسين العاملين في تصميم، وبناء وتشغيل وصيانة مخازن التبريد بالمبادئ الهندسية الخاصة بهذا المجال المهم. ويقدم الكتاب عرضا لمكونات هذه المخازن وطريقة عملها وكيفية تصميمها، وذلك من خلال خمسة عشر فصلا بالإضافة إلى خمسة ملاحق.

في الفصل الأول من الكتاب نقدم مقدمة لمخازن التبريد وأهميتها في الحياة المعاصرة.

وتقدم الفصول الثاني والثالث والرابع أهم الأساسيات والمبادئ الهندسية اللازمة للمهندسين المهتمين بتصميم وتشغيل وصيانة مخازن التبريد، في الفصل الثاني نقدم مبادئ هندسة التبريد التي يقوم عليها مخازن التبريد، ويشمل الفصل دورة التبريد بانضغاط البخار، وأهم عملياتها، والعلاقات الرياضية بها وأسباب حيود الدورة عن الدورة المثالية، وتأثير الظروف الخارجية، مثل: درجة حرارة غرفة التبريد، ودرجة حرارة الجو المحيط على أداء الدورة. ويقدم الفصل الثالث خواص الهواء الرطب. ويقدم الفصل الرابع مبادئ سريان الموائع وانتقال الحرارة، ويشمل ذلك عرضا لقانون بقاء الكتلة، وموازنة الطاقة لسريانات الموائع، والعلاقات اللازمة لحساب فقد الضغط للسريانات داخل الأنابيب

والمواسير، وتعريف انتقال الحرارة بالتوصيل وبالحمل وبالإشعاع والعلاقات الرياضية المستخدمة للتنبؤ بمعدل انتقال الحرارة في تطبيقات مخازن التبريد، كما يعرض أيضا الفصل توضيحًا لاستخدام الزعانف كأسطح ممتدة من جهة الهواء في ملفات التبريد والمكثفات المبردة بالهواء، وعرضا لاستخدام المبادلات الحرارية والنماذج الحسابية الخاصة بتصميمها والتنبؤ بأدائها.

يقدم الفصل الخامس أسباب تلف الأغذية والعوامل التي تؤدي إلى ذلك، ويقدم الفصل أيضا ظاهرة فقد الماء من الأغذية وتنفس الخضروات والفواكه والحمل الحراري الناتج عن ذلك. كما يقدم الفصل أيضا الشروط المثلى الواجب أخذها في الاعتبار لحفظ الأنواع المختلفة من الأغذية في مخازن التبريد. نقدم بعد ذلك أهم الاعتبارات الهندسية الواجب أخذها في الاعتبار عند بناء مخازن التبريد في الفصل السادس، ويشمل ذلك طرق البناء ومواصفاته، والأساس والأرضية، وتخطيط مخازن التبريد، وطرق رص ونقل المواد المخزنة، وتقدير حجم المواد المخزنة بكل غرفة من الغرف. كما يتعرض الفصل أيضا لما يجب اتباعه للخفض الأولي لدرجة حرارة غرفة التخزين والمشاكل الناجمة عن تغير الضغط بالغرفة نتيجة لذلك.

يعتبر الفصل السابع قلب الكتاب الحالي، ويعنى هذا الفصل بتقدير حمل التبريد لكل غرفة من غرف التبريد، وذلك بهدف تقدير وتوصيف معدات التبريد اللازمة لعمل المخزن. ويشمل الفصل عرضًا للمكونات المختلفة لحمل التبريد، مثل: حمل التبريد المنتقل من الحوائط والسقف والأرضية، وحمل التبريد الناتج عن المواد المخزنة، وحمل التبريد الناتج عن تسرب الهواء من خارج غرفة التبريد إلى داخلها. في الفصل الثامن، يتم استعراض نظم التبريد سواء النظم أحادية المرحلة أم متعددة المراحل، تستخدم مخازن التبريد عدة نظم للتبريد تبعًا

لدرجة حرارة التخزين، وإن كانت هذه الدرجة في بعض المخازن تحت الصفر أم لا، ويبين الفصل مميزات وعيوب كل نظام من هذه النظم وكيفية عمله وتصميمه.

تخصص الفصول من تسعة إلى الثاني عشر لمكونات نظم التبريد في مخازن التبريد من غير ماكينات التبريد. ويقدم الفصل التاسع طرق تصميم أنابيب ومواسير المبرد في خطوط السحب من المبخر، وخطوط الغاز الساخن القادم من الضاغط إلى المكثف، وخطوط المبرد السائل العائد من المكثف، ويعرض الفصل كيفية تحديد مسارات وأقطار هذه المواسير والأنابيب والاعتبارات الهندسية التي يلزم أخذها في الاعتبار لضمان عمل نظم التبريد بالكفاءة المرجوة منها. ويعرض الفصل العاشر التحكم في نظم التبريد المستخدمة في مخازن التبريد. نعرض تصميم واختيار العزل الحراري وحاجز البخار في الفصل الحادي عشر، ويبين الفصل كيفية اختيار السمك الأمثل للعزل الحراري للموازنة بين التكاليف الأولية لبناء مخزن التبريد وتكلفة التشغيل، كما يقدم الفصل أيضا أهمية توصيف واختيار وتركيب حاجز البخار في مخازن لتبريد للحد من تسرب بخار الماء من خارج غرف التبريد إلى داخلها، كما يبين الفصل الثاني عشر نظم إذابة الصقيع من حيث عملها، وتصميمها وتشغيلها.

يقدم الفصلان الثالث عشر والرابع عشر مكونات ماكينات التبريد، فيقدم الفصل الثالث عشر عرضا للضواغط الترددية والضواغط اللولبية المستخدمة في ماكينات تبريد مخازن التبريد، وعمل هذه الضواغط والعلاقات الرياضية الحاكمة لأداء هذه الضواغط، ويقدم الفصل الربع عشر ملفات التبريد والمكثفات المبردة بالماء والمكثفات المبردة بالهواء وطرق عملها والعلاقات الرياضية التي تحكم أدائها وكيفية اختيارها وتوصيفها. كما يقدم الفصل أيضا وحدات التكثيف

الشائعة تجاريًا، والتي تضم الضاغط والمكثف في معدة واحدة، وكيفية اختيار هذه الوحدات من كتلوجات الشركات المصنعة، ويقدم الجزء الأخير من الفصل توافق أداء ملفات التبريد ووحدات التكثيف عند عملها معا في ماكينة للتبريد.

في الفصل الخامس عشر، يتم وضع خطوات مفصلة لتصميم غرفة تبريد، ويستفاد من العلاقات الرياضية المعطاة في الفصل السابع، كما تم عمل برنامج حاسب آلي على اكسل (Excel) لتسهيل الحسابات، كما تم إدراج مثال محلول على ذلك.

يشمل الكتاب أيضا خمسة ملاحق، بالإضافة إلى قائمة المراجع وثبت المصطلحات العربية والإنجليزية، وتشمل هذه الملاحق: خواص وجداول بعض المبردات المستخدمة في غرف التبريد، وخواص الهواء الرطب، والخواص الثيرموديناميكية للماء والهواء الجاف، ومعاملات التحويل للوحدات السائد استخدامها في هذا المجال.

المحتويات

٥. متطلبات ومواصفات التبريد لحفظ الأغذية

٦. الاعتبارات الهندسية لبناء وتشغيل مخازن التبريد

٧. حمل التبريد

٨. نظم التبريد

٩. تصميم أنابيب ومواسير المبرد

١٣. الضواغط

١٤. ملفات التبريد والمكثفات

١٥. تصميم مخازن التبريد

الملاحق

الفصل الأول
مقدمة

١,١ أهمية مخازن التبريد

يتناول هذا الكتاب موضوعًا يلامس حياتنا اليومية بشكل مباشر، ألا وهو مخازن التبريد لحفظ المواد الغذائية. ويمكن الجزم بأنه لا توجد أي مدينة معاصرة بدون مخازن تبريد بأحجامها المختلفة، بدءًا من الثلاجات المنزلية، إلى مباني مخازن التبريد العملاقة التي يمكن الحركة داخلها بسيارات ومعدات نقل البضائع. ويعنى الكتاب الحالي بمخازن التبريد كبيرة الحجم، أي التي يتم تصميمها وبنائها حسب الاحتياج، وبالتالي لا يشمل الكتاب الثلاجات المنزلية أو ما يماثلها من الثلاجات سابقة التصنيع بأحجامها المختلفة.

تقسم مخازن التبريد تبعا لدرجة الحرارة بها إلى مخازن تبريد أو مخازن تجميد أو مخازن تبريد وتجميد، وإن كانت تعرف جميعا مجازًا باسم مخازن تبريد. أيضا، تقسم مخازن التبريد من حيث التصنيع إلى مخازن (أو غرف تبريد) مسبقة الصنع، ومخازن تبريد يتم تصميمها وإنشاؤها في الموقع حسب مساحة الموقع ورغبة المالك وعناصر التصميم الأخرى.

يتم إنشاء مخازن التبريد واستخدامها للمحافظة على المواد الغذائية من التلف، فالعامل الاقتصادي هو العنصر الأساسي المحرك لإنشاء مخازن التبريد والتجميد. ولقد صاحَب التوسع في إنشاء مخازن التبريد الاهتمام بنقل المواد المبردة بوسائل نقل مختلفة (برًا وجوًا وبحرًا) وضمان وجود سلسلة من مخازن التبريد الساكنة والمتحركة حتى يسهل نقل المواد الغذائية من موقع تحصيلها أو صناعتها إلى مائدة المستهلك دون تعرضها للتلف خلال التحميل أو الشحن أو النقل أو التفريغ.

١,٢ طرق حفظ الأغذية

حاول الإنسان منذ القدم المحافظة على المواد الغذائية لفترات زمنية طويلة بالعديد من الطرق للاستفادة من هذه المواد عندما يتعثر الحصول على الغذاء أو عندما يندر وجود بعضا من أصنافه، وكان التبريد والتجميد واحدًا من هذه الطرق. وتعمل جميع الطرق التي اكتشفها الإنسان وطورها عبر الزمن على القضاء على الكائنات الدقيقة الضارة أو إبطاء نموها للمحافظة على المواد الغذائية من الفساد الذي يؤدي إلى تغير في كل أو بعض من الخصائص الخاصة بالطعم أو المذاق أو الشكل أو القيمة الغذائية. وتتم المحافظة على المواد الغذائية عادة بتغيير المناخ اللازم لنمو هذه الكائنات، مما يعمل على موتها أو الحد بشكل فعال ومؤثر من تكاثرها. تختلف طرق حفظ المواد الغذائية فيما بينها تبعا للخاصية الأساسية المستخدمة لحفظها، مع استخدام بعض الطرق لأكثر من خاصية من هذه الخصائص. ونعرض فيما يلي بعضا من أهم الطرق المستخدمة لحفظ المواد الغذائية.

تعمل بعض الطرق على المحافظة على المواد الغذائية عن طريق خفض محتوي الرطوبة بالمادة الغذائية، فمثلا يستخدم التجفيف لحفظ الحبوب والبقول والفاكهة واللحوم والأسماك وغيرها. ويعتبر التجفيف من أقدم الطرق التي عرفها الإنسان لحفظ الأغذية. ويتم التجفيف أما طبيعيا بتعريض المادة الغذائية لأشعة الشمس مباشرة، أو صناعيا باستخدام سخانات ومراوح لتوزيع الهواء الساخن على المادة الغذائية المطلوب تجفيفها. كما يستخدم أيضا التجفيف بوضع المادة الغذائية في فراغ (أي عند ضغط يقترب من الصفر المطلق). ويعيب عملية التجفيف تغير شكل وطعم والقيمة الغذائية للمواد التي يتم تجفيفها. ويتم التجفيف أيضا في بعض الأحيان بإضافة ملح الطعام لحفظ اللحوم والأسماك، فيعمل الملح على سحب الماء من هذه اللحوم والأسماك، مما يحول دون فسادها لفترات طويلة.

ويعتبر تسخين بعض المواد الغذائية لدرجة غليان الماء كافيا لقتل الكائنات الدقيقة الضارة بها، ثم يتم تعليبها وحفظها للحيلولة دون وصول الهواء الخارجي المحمل بالكائنات الدقيقة الضارة إليها، وتستخدم هذه الطريقة بكثرة لحفظ الخضراوات والفواكه والحليب ومشتقاته، وغيرها. وتُحفظ بعض المواد الغذائية أيضا عن طريق وضعها في محلول غير صالح لحياة الكائنات الدقيقة أو تكاثرها. ويعتبر التخليل أحد هذه الطرق، حيث تحفظ المادة الغذائية في محلول من الملح والليمون أو الملح والخل، كما هو الحال في حفظ الخيار والجزر والليمون والمانجو والزيتون وغيرها. وكذلك يمكن حفظ بعض المواد الغذائية بوضعها في محلول سكري، كما هو الحال في حفظ بعض أنواع الفاكهة مثل الكمثرى والتفاح. وتحفظ بعض أنواع الأغذية مثل اللحوم والأسماك والجبن أيضا فيما يعرف بالتدخين، أي بتعريض المواد الغذائية لدخان الأخشاب، حيث لاحظ الإنسان عبر التاريخ تأثير هذا الدخان على الحد من نشاط الكائنات الدقيقة وتكاثرها.

ومن الطرق الحديثة التي تستخدم أيضا لحفظ بعض المواد الغذائية المعالجة الإشعاعية، حيث يتم تسليط أيونات إشعاعية على المادة الغذائية للقضاء على الكائنات الدقيقة المسببة لتلفها. ومن الطرق الواعدة أيضا حفظ المواد الغذائية بتعرضها لنبضات من مجال كهربائي، وما زالت هذه الطريقة تحت البحث والتطوير. كما تم تطوير طريقة أخرى جديدة لحفظ المواد الغذائية بتعرضها لضغط جوي مرتفع، مما يُصعِب على الكائنات الدقيقة الحياة أو التكاثر به. ولقد أثبتت هذه الطريقة نجاحا في السنوات الأخيرة لحفظ العصائر واللحوم الباردة.

يأتي حفظ المواد الغذائية بالتبريد والتجميد كواحد من أقدم الطرق التي عرفها الإنسان. ومع تقدم العلم والتقنيات المختلفة تطورت هذه الطريقة بشكل

كبير وفعال. ويتميز حفظ الأطعمة بالتبريد والتجميد مقارنة بالطرق الأخرى لحفظ الأغذية بعدم وجود أي إضافات للمواد الغذائية مع احتفاظ المادة الغذائية بشكل كبير بشكلها و لونها الأساسي. ويعمل التبريد على إيقاف أو إبطاء نمو وتكاثر البكتريا الضارة. وينبغي الإشارة هنا إلى أن لكل مادة غذائية شروط مثلى لحفظها من حيث درجة الحرارة والرطوبة. ويمكن الرجوع إلى الفصل الخامس لمزيد من التفصيل حول حفظ المواد الغذائية بالتبريد والتجميد. كما يجب الإشارة إلى أن التبريد والتجميد يحتاجان إلى طاقة كهربائية (في العادة) عالية نسبيا لتشغيل المعدات الميكانيكية اللازمة للوصول إلى درجات الحرارة المتدنية لحفظ الأغذية عندها.

١,٣ مخازن التبريد

مخازن التبريد هي مستودعات يتم التحكم في ظروف مناخها الداخلي من حيث درجات الحرارة والرطوبة وتوزيع الهواء بالمناطق المختلفة بها. وتُبنى هذه المستودعات بأحجام مختلفة، فقد تكون أقل من عدة أقدام مكعبة أو ما يعرف بالثلاجات المنزلية، أو تزيد إلى عشرات الآلاف من الأمتار المكعبة، تبعا للغرض التي بنيت من أجله.

تُستَخدم مخازن التبريد في العديد من التطبيقات، من أهمها حفظ الأغذية في حالتها المختلفة، سواء الطازجة أو المصنعة، بالإضافة إلى التطبيقات الأخرى مثل حفظ الأدوية واللقاحات والدم، وحفظ الأعضاء البشرية، وغيرها. ويعنى الكتاب الحالي بمخازن التبريد الخاصة بحفظ الأغذية فقط.

ومن ضمن التطبيقات المهمة والمفيدة التي استخدمت فيها مخازن التبريد، مشروع حفظ لحوم الهدي والأضاحي في أيام التشريق في موسم الحج بالمملكة العربية السعودية، حيث يتم تخزين لحوم هذه الأضاحي ثم الاستفادة منها لإطعام المحتاجين في العالم الإسلامي. ويعتبر مشروع الإفادة من مشروع الأضاحي الذي يشرف عليه البنك الإسلامي للتنمية في جدة مشروع اقتصادي اجتماعي

تكافلي من الدرجة الأولى، حيث يتم سنويا ذبح الماشية (أغنام وأبقار وجمال) في مشعر منى ثم تجمد هذه اللحوم في الحال وتحفظ في مخازن تبريد ذات سعات كبيرة جدا تم إنشاؤها في منى لهذا الغرض.

١,٤ تاريخ مخازن التبريد

يرجع تاريخ مخازن التبريد إلى بداية القرن الثامن عشر مع بدأ حفظ اللحوم في شمال الولايات المتحدة الأمريكية، وفي بعض البلاد الأوربية التي تتوفر بها الثلوج الطبيعية شتاءً، حيث قام البعض ببناء مخازن حفظ اللحوم باستخدام الثلج مع استخدام نشارة الخشب كعازل حراري للمحافظة على الثلج لأطول فترة ممكنة دون الذوبان. ولم يصل القرن التاسع عشر إلى منتصفه إلا واستطاع بنيامين نيس (Benjamine Nyce) في ولاية أنديانا بالولايات المتحدة الأمريكية عام ١٨٥٨م من بناء أول مخزن تبريد يعمل بالثلج الطبيعي، مع استخدام مراوح لتدوير وتوزيع الهواء البارد في جميع أنحاء المخزن. ويعتبر دكتور هنري هورد ((Henry Howard) بمدينة سان أنطونيو بولاية تكساس بالولايات المتحدة الأمريكية في عام ١٨٦٨م أول من قام ببناء مخزن لتجميد اللحوم وحفظها بالثلج الطبيعي (Hallowell, 1980) .

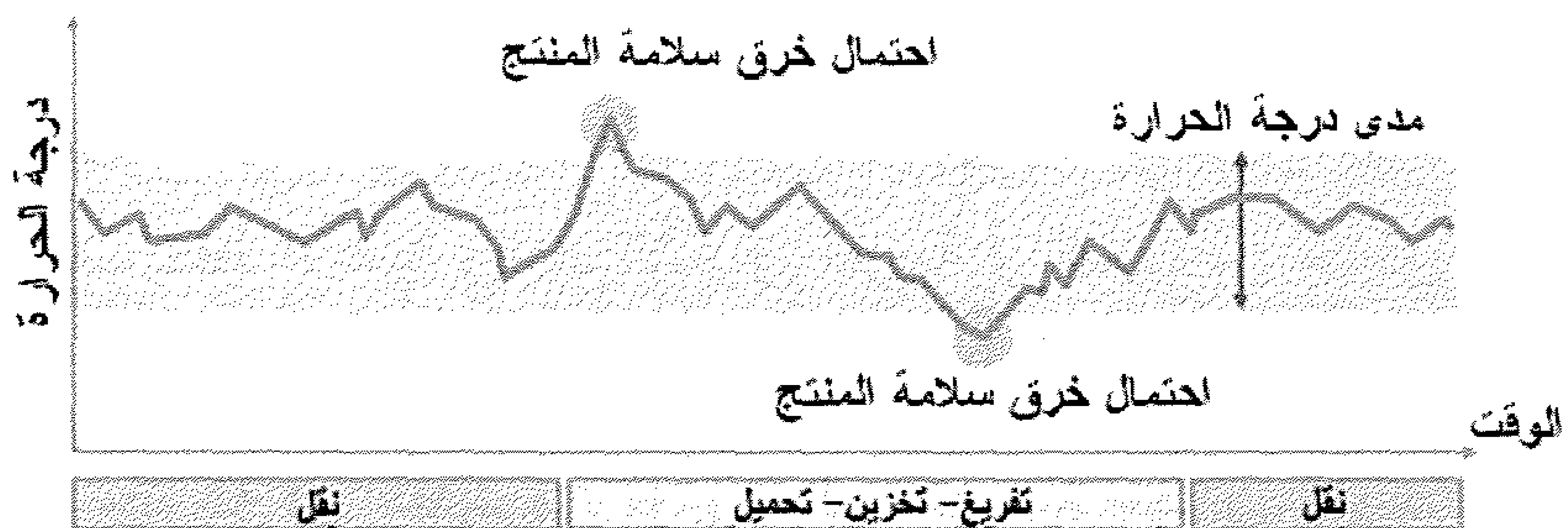
تم بناء مخازن التبريد التي تعمل بالتبريد الميكانيكي بالولايات المتحدة ابتداءً من عام ١٩٣٠م مع بداية تطور التبريد الصناعي والاستفادة منه تجاريا، حيث بُنيت غرف حفظ اللحوم ملحقة بمصانع إنتاج الثلج. وقد صاحب تحسين أداء معدات التبريد الميكانيكي وتطورها بشكل كبير إلى زيادة التوسع في بناء مخازن التبريد بهدف حفظ الأغذية وإمداد الأسواق القريبة أو البعيدة من مناطق إنتاج بهذه الأغذية. وشهد النصف الثاني من القرن العشرين بناء مخازن التبريد بأحجام مختلفة ولتطبيقات متنوعة في العديد من دول العالم. فتم بناء مخازن التبريد التي تضم العديد من المستودعات الداخلية التي يمكن التحكم في درجة حرارتها، سواء كانت

درجة الحرارة تحت درجة التجمد أو فوقها، أو مخازن التبريد التي تستخدم لتخزين منتج واحد فقط له احتياج محدد من درجات الحرارة والرطوبة النسبية. أيضًا، عرفت مخازن التبريد العامة التي يتم تأجير غرفها حسب الطلب، هذا بالطبع بالإضافة إلى مخازن التبريد الخاصة بالشركات التي لا يتم تأجيرها لآخرين.

١,٥ السلسلة الباردة

تتكون السلسلة الباردة (cold chain) من مجموعة من الأماكن أو المخازن الباردة التي يتم التحكم في درجة حرارتها في مدى معين (عادة بين ٢ إلى ٨ درجة مئوية)، وبدون أن تشمل هذه السلسلة أي مكان لا يتم فيه التحكم في درجة الحرارة. وتستخدم هذه السلسلة لحفظ، وتوزيع وبيع المنتجات الغذائية سواء الطازجة أو المصنعة، والخضراوات والفاكهة، واللحوم والأسماك ..الخ، والأدوية والمواد الكيميائية، وخام أفلام التصوير وغيرها. تعمل السلسلة الباردة على إبطاء نمو الفطريات والبكتريا التي تؤدي إلى فساد المنتجات وقصر عمرها، و بذلك يتم ضمان وصول المنتج من مركز إنتاجه إلى المستهلك مرورًا بعملية النقل والتحميل والتخزين دون أن يتعرض للتلف.

ويبين شكل ١,١ تغير درجة الحرارة مع الوقت خلال سلسلة باردة بدأت بعملية نقل، ثم تفريغ إلى مخزن تبريد حيث تحفظ لمدة زمنية ثم يتم التحميل إلى وسائل نقل مرة أخرى.



شكل ١,١ تغير درجة الحرارة مع الزمن خلال سلسلة باردة.

تتكون السلسلة الباردة تبعا للاحتياج من مخازن التبريد، ووسائل النقل المبردة (عربات نقل وقطارات للنقل البري، وطائرات للنقل الجوي، ومراكب وسفن للنقل البحري) وثلاجات العرض. وتعرف كفاءة السلسلة الباردة بكفاءة أضعف نقطة بها. فمثلا تتأثر كفاءة السلسلة الباردة بعدة عناصر تؤثر في كل مرحلة من مراحل السلسلة الباردة، ومن هذه العناصر على سبيل المثال لا الحصر الآتي: درجة الحرارة، والتغليف، والمناولة. ويمكن بسهولة التعرف على مدى كفاءة عنصري التغليف والمناولة في كل مرحلة من مراحل السلسلة والتعرف على أي ضرر قد يكون ألم بهما، إلا أن تعرض المنتج لدرجة حرارة خارج المدى المسموح به قد يسبب تلف المنتج. لذا يجب وضع الأجهزة اللازمة لمراقبة تغير دراجة الحرارة مع الزمن خلال جميع مراحل السلسلة الباردة للتأكد من سلامة المنتج. ويعتبر ذلك شرط أساسي لشركات التأمين على نقل المنتجات التي تحتاج إلى تحكم في درجة الحرارة، مثل نقل الفاكهة على سبيل المثال في حالة نقل المواد الغذائية، أو نقل اللقاحات الطبية المختلفة. ومن أهم الأسباب التي قد تؤدي إلى عدم التحكم في درجة الحرارة في المدى المحدد خلال وسائل النقل المبردة الآتي:

- توقف معدات التبريد لبعض الوقت نتيجة انقطاع مفاجئ بالكهرباء أو لوجود عطل بهذه المعدات، أو الإيقاف المتعمد لمعدات التبريد بواسطة السائق لتوفير الوقود.
- سوء توزيع الهواء في المكان المبرد.
- تلف العازل الحراري في كل أو بعض الأماكن.
- تسرب هواء خارجي إلى المكان المبرد نتيجة وجود بعض الفتحات التي تعمل على دخول هواء خارجي، أو قيام السائق بترك الباب الخارجي للمكان المبرد مفتوحا لفترة طويلة.

وتؤدي نفس الأسباب السابقة إلى عدم التحكم في درجة الحرارة لتكون في حدود المسموح به خلال عملية التخزين والتبريد، ويضاف إلى ذلك الآتي:

- ترك المنتجات لفترات طويلة في منطقة التفريغ أو التحميل.

للأسباب السابقة يجب مراقبة تغير درجة حرارة الجو المحيط بالمنتجات مع الزمن خلال جميع مراحل السلسة الباردة للتأكد من عدم تعرض المنتجات لدرجات حرارة عالية قد تؤدي إلى تلف المنتجات. ولقد قام العديد من المصنعين بتصميم أجهزة لقياس درجة الحرارة وتسجيل تغيرها مع الزمن باستخدام التقنيات الرقمية الحديثة عن طريق موجات صوتية كموجات الراديو على سبيل المثال.

وتعتبر ثلاجات العرض لبيع المنتجات الغذائية هي أضعف نقاط السلسلة الباردة. ويلزم أن تكون ثلاجات العرض من نوعية جيدة تعمل على المحافظة على درجة حرارة المنتجات المعروضة بها. أيضا، يجب أن تعمل هذه الثلاجات بدون السماح بدخول هواء ساخن من المناطق المحيطة إليها.

ويعتبر التغليف من العناصر المهمة التي تعمل على حفظ المنتجات خلال النقل في السلسلة الباردة. فيجب أن يكون من المتانة بالدرجة الكافية لحماية المنتج أثناء عملية النقل والتحميل والتفريغ. أيضا يجب وجود طبقة من مانع تسرب بخار الماء لمنع فقد نسبة من محتوى الرطوبة بالمنتجات التي يكون محتوى الرطوبة بها مهما. كما يجب أن تكون صناديق التعبئة بمقاسات وأشكال قياسية تساعد على تخزين أكبر عدد من الصناديق في الحجم المتاح للتخزين. ولقد تم تطوير وتنمية نظم التغليف بشكل مرضٍ عبر السنين.

أيضا، يجب أن يكون هناك توزيع جيد للهواء في وسيلة النقل لضمان المحافظة على درجة حرارة مناسبة بجميع المنتجات المنقولة. كما تحتاج المنتجات الزراعية الطازجة والفواكه الطازجة إلى تجديد الهواء بشكل مستمر

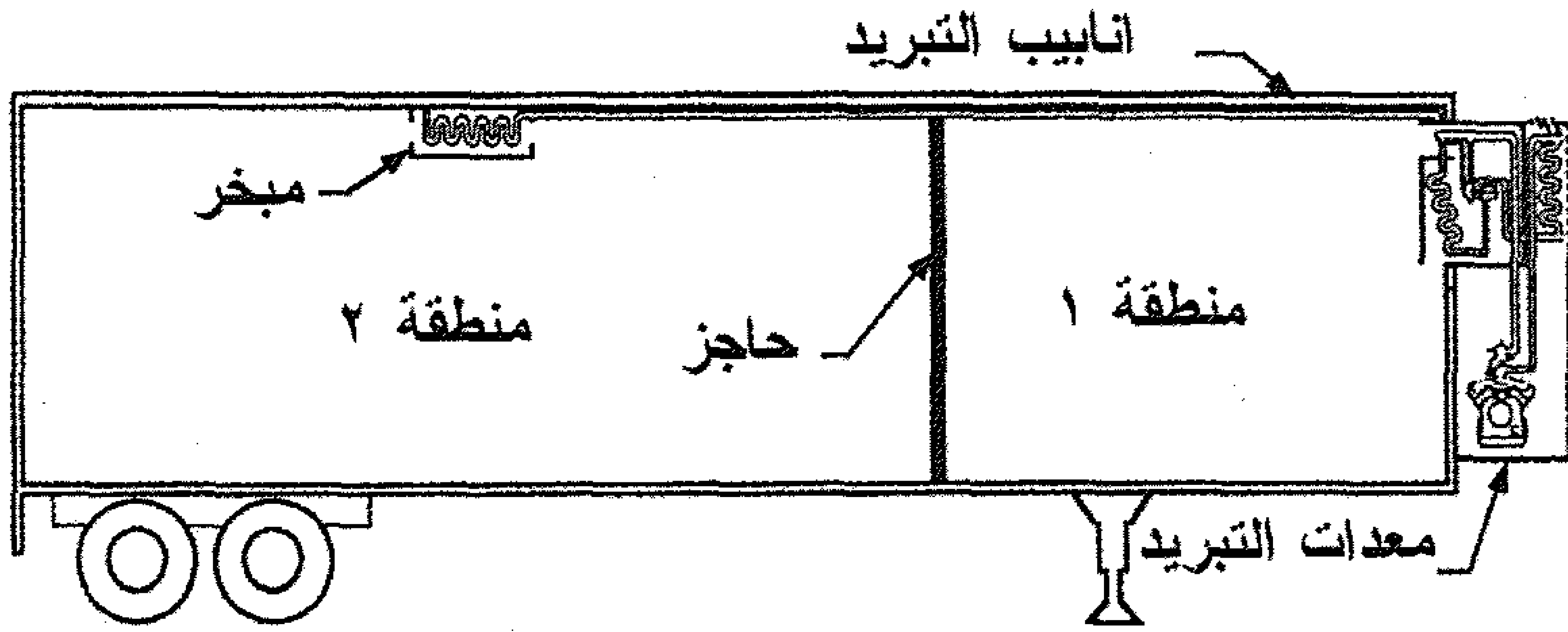
نتيجة لتنفس هذه المنتجات أثناء تخزينها، ويجب توضيح المعدل المطلوب لكل شحنه قبل بدء عملية النقل.

١,٦ وسائل النقل المبردة

تستخدم العديد من وسائل النقل لنقل المنتجات من أماكن تحضير المنتج إلى مخازن التبريد أو إلى أماكن العرض للبيع. ويلزم في هذه الوسائل العمل على حفظ درجة حرارة المنتج عند استلامه في المدى المسموح به، وكما أن ارتفاع درجة الحرارة في مخزن التبريد يؤدي إلى تلف المنتج فكذلك الحال انخفاض درجة الحرارة عن الحد المسموح.

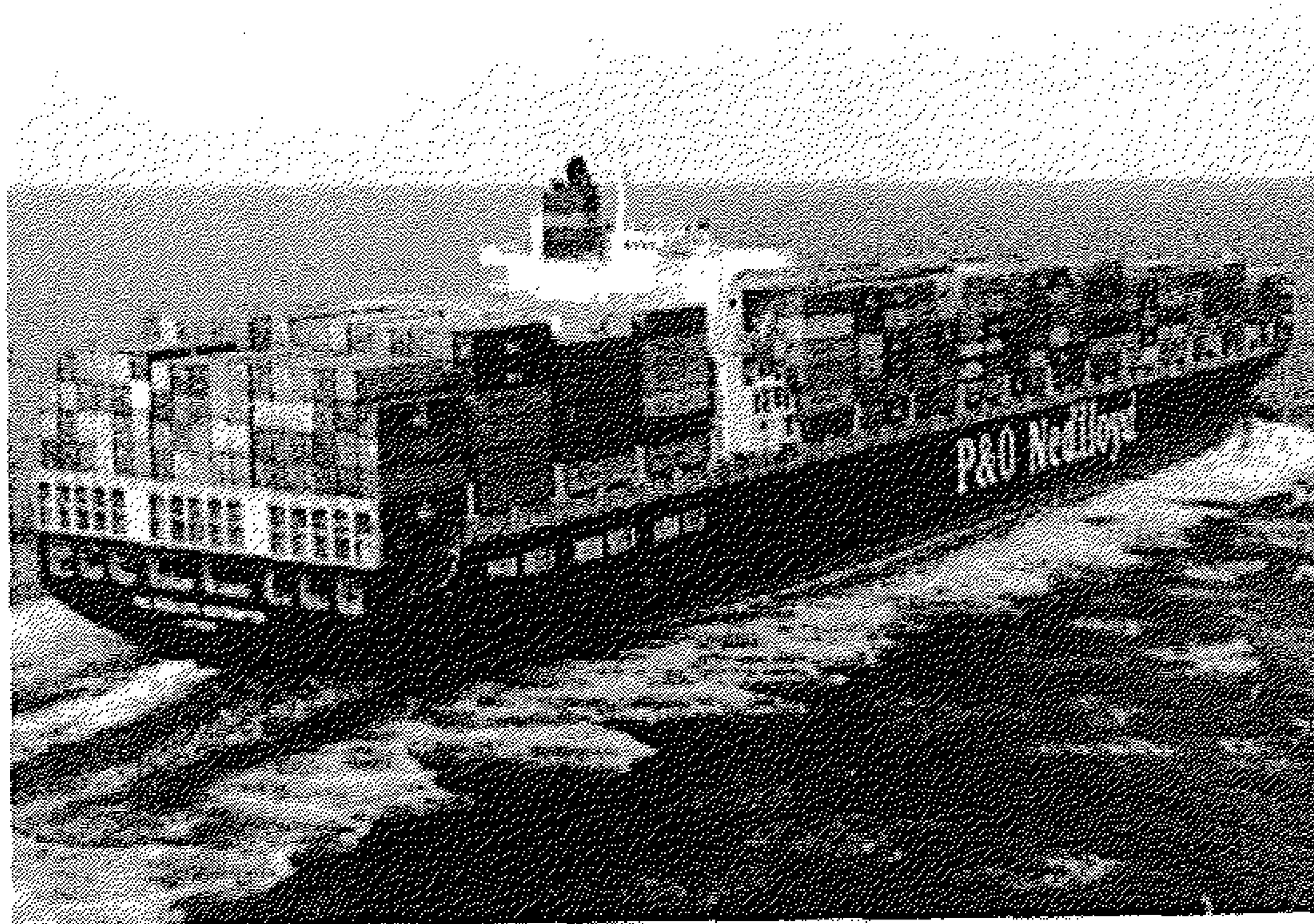
وتضم وسائل النقل عربات النقل بمقاساتها المختلفة والمراكب والسفن والطائرات بالإضافة إلى الحاويات المبردة. وقد يؤدي عدم المحافظة على درجة الحرارة إلى تلف المنتج. وفي حالة نقل المواد الغذائية والخضراوات والفواكه، فإن عدم المحافظة على درجة الحرارة عند القيمة الموصي بها قد يؤدي ذلك إلى الإسراع في نضج الفواكه والخضراوات، وفقد في الوزن، وتغير في الشكل والإصابة بالفطريات والعفن. كما يجب تأمين المنتجات على الأرفف للتأكد من عدم حركتها أثناء عملية النقل لمنع تلف مكونات التغليف والمنتجات.

الحاويات المبردة (انظر شكل ١,٢) عبارة عن حاوية يتم تبريدها ميكانيكيا لنقل البضائع التي تتطلب التحكم في درجة حرارة حفظها. وتبرد هذه الحاويات بماكينات تبريد ملحقة بها تغذى بمصدر كهربائي من السفن التي تنقلها أو من نقاط تغذية أرضية بالمواقع الأرضية لشحن وتفريغ السفن، أما عند نقلها برًا بسيارات النقل، فيتم تغذيتها بمولدات الديزل الملحقة بسيارات النقل. وتعزل جدار الحاويات جيدًا باستخدام البوليوريثان الرغوي بسمك ٧٥مم للحوائط والأرضية، و١٠٢مم للسقف (ASHRAE 2006). ويوضح شكل ١,٣ سفينة شحن محملة بالحاويات.



شكل ١,٢ حاوية مبردة لنقل البضائع [ASHRAE 2011].

وتأتي الحاويات عادة بمقاسات قياسية محددة، فتكون بمقاس ٨ قدم مكعب (أي ٢,٤٣٨ متر مكعب)، أو بأطوال ١٠ قدم (٣,٠٥ متر)، أو ٢٠ قدم (٦,١ متر)، أو ٤٠ قدم (١٢,٢ متر). وتكون سعة الحاويات بمضاعفات السعة القياسية والتي يعطى لها الرمز TEU وهي الاختصار للمصطلح Total Equivalent Unit والتي تعني الوحدة المكافئة الكلية لحاوية بطول ٢٠ قدم وعرض ٨ قدم، ويكون الارتفاع أما ٩,٥ قدم وهو ما يعرف بحاوية بارتفاع كامل، أو ٤,٢٥ قدم وهو ما يعرف بحاوية بنصف ارتفاع. وتساعد الأبعاد القياسية للحاويات على الاستفادة القصوى من حجم تخزينها بالسفن ومواقع التحميل والتفريغ الأرضية للسفن وكذلك توفير المعدات.



شكل ١,٣ سفينة شحن محملة بالحاويات.

وتأتي عربات السكة الحديد بأطوال تتراوح من ١٥ إلى ٢٠ مترًا، وتكون هذه العربات معزولة حراريًا وتحوي كل عربة معدات التبريد الخاصة بها في أحد أطرافها.

ويقتصر النقل الجوي في السلسلة الباردة عادة على البضائع المبردة (أي غير المجمدة) أو عند درجة حرارة الجو. بينما يستخدم النقل البحري في جميع التطبيقات عادة ما لم يكن عنصر الزمن هو العنصر المتحكم في أخذ القرار. وتستخدم السفن والمراكب المبردة لنقل الأحجام الكبيرة من البضائع والمنتجات. كما تستخدم سفن البضائع لنقل الحاويات المبردة (انظر شكل ١,٣). ويستخدم النقل البري المبرد (بالسيارات أو القطارات) لنقل البضائع بأي أحجام. ويوضح شكل ١،٤ أحد عربات النقل المبردة التي تقوم بنقل حاوية، ويوضح شكل ١،٥ عربة نصف نقل مبردة لنقل البضائع المبردة. يمكن في بعض وسائل نقل المواد المبردة كالشاحنات استخدام المواد المتغيرة الطور (phase change materials) في حفظ المواد المبردة، حيث يمكن تخزين البرودة (إذا صح التعبير) في هذه المواد وتحويلها عند التبريد من الحالة السائلة إلى الحالة الصلبة. خلال عملية النقل ودخول الحرارة إلى الشاحنة فإن المادة تمتص الحرارة وتتحول من الحالة الصلبة إلى الحالة السائلة. ويمكن استخدام هذه المواد في نقل المواد المبردة لمسافات قصيرة، وقد يؤدي استخدام هذه المواد إلى اختيار معدات تبريد أصغر حجمًا. ويوضح الشكل ١,٦ شاحنة تم تغطية سقفها بالمادة متغيرة الطور.

زاد في الآونة الأخيرة استخدام النقل الجوي في نقل المواد المبردة. معظم طائرات نقل الركاب لها القدرة أو هي مهيأة لنقل البضائع والمواد المبردة. ولأن نقل الركاب من مكان إلى آخر يتم حسب جدول محدد، فإنه أيضا يمكن الاستفادة من ذلك في نقل المواد المبردة في حاويات خاصة للطائرات على متن طائرة الركاب ذاتها في أماكن مخصصة للمواد المبردة. ويبين الشكل (١,٧) جسم

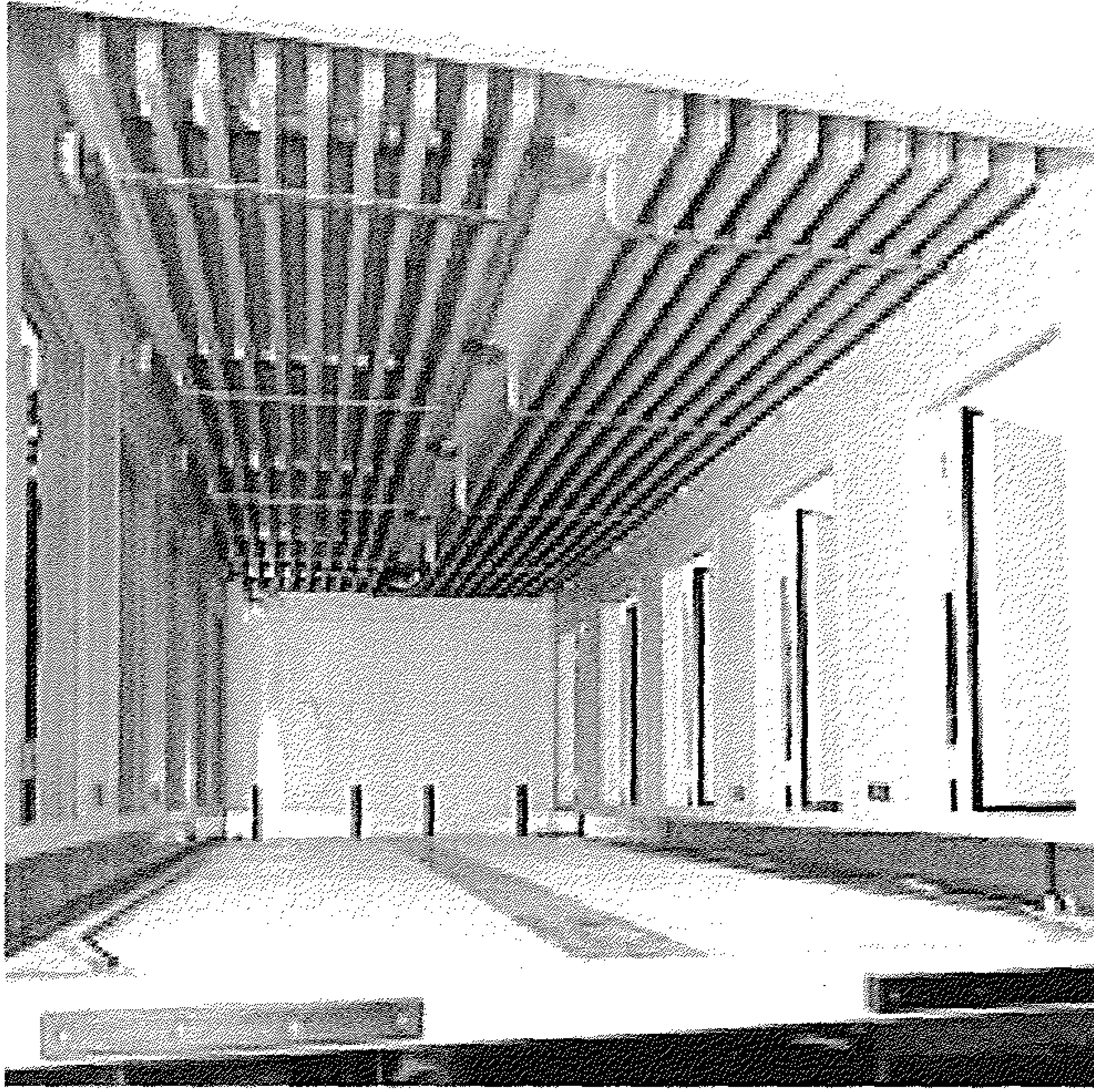
طائرة، حيث تم تقسيم الطائرة إلى جزأين أحدهما للركاب والآخر كمستودع للمواد.



شكل ١,٤ عربة نقل لنقل حاوية بها بضائع مبردة.



شكل ١,٥ عربة نصف نقل مبردة.

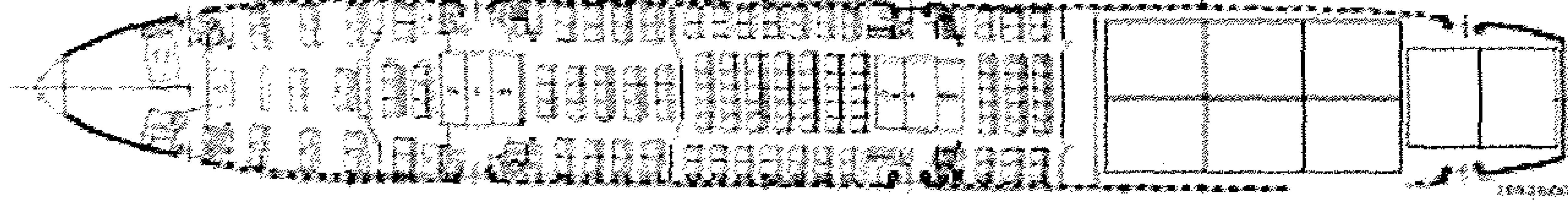


شكل ١,٦ شاحنة لنقل المواد المبردة تم تغطية سقفها بشرائح بها مادة متغيرة الطور (www.frigoblock.com).

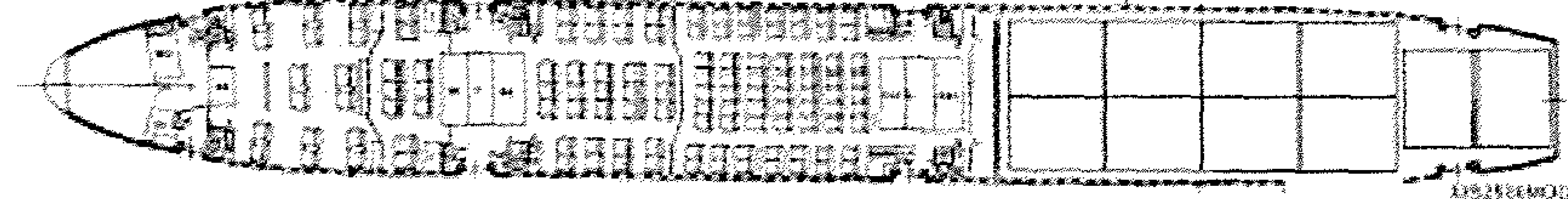
طائرة بـــ ٦ منصات



طائرة بـــ ٨ منصات



طائرة بـــ ١٠ منصات



شكل ١,٧ أنواع من الطائرات العريضة الحاملة للركاب والمواد المبـــردة (ASHRAE 2006).

من المعلوم أنه كلما زاد ارتفاع الطائرة عن سطح البحر فإن درجة الحرارة تقل، ويمكن الاستفادة من ذلك في التحكم في درجات الحرارة في المكان المخصص لتخزين المواد حسب نوعها ورغبة المشغل.

وبطبيعة الحال، فإن المستوى المتدني من درجات الحرارة غير متوفر على الأرض، ولذلك لا بد من المحافظة على درجة حرارة المواد المخزنة على الأرض باستخدام وسيلة أخرى مثل استخدام الثلج الجاف أو التبريد الأولي. وقد يتوفر في بعض المطارات أماكن خاصة لتخزين المواد المبردة.

من المواد التي يتم نقلها عن طريق الجو: الفواكه والخضراوات، والورود والأزهار، واللحوم، وصغار الطيور، والمأكولات البحرية، والأجزاء البشرية، والمواد الطبية، وغيرها.

و يمكن نقل المواد المبردة بسرعة قبل فسادها، وخصوصا إذا كان نقلها بالبر أو البحر قد يسبب تلفها، كما أن العامل الاقتصادي يلعب دورًا مهما في اختيار النقل الجوي كوسيلة لنقل المواد المبردة، خصوصا عند قلة المعروض وارتفاع الأسعار، ويعتبر مثال نقل الورود والأزهار أفضل مثال على ذلك، حيث تصل الأزهار إلى المستهلك وكأنها قطفت للتو.

وطبقا للتقرير الذي أعده هيب في عام ٢٠٠٦ (Heap 2006)، فإن أعداد السفن المبردة المستخدمة في العالم تقدر بحوالي ١٣٠٠ سفينة، بينما يقدر عدد عربات السكة الحديد المبردة بحوالي ٨٠,٠٠٠ عربة، وحوالي ٦٥٠,٠٠٠ حاوية مبردة، وحوالي ١,٢ مليون سيارة نقل مبردة. ولقد أفاد تقرير هيب أيضا بأن تلف المنتجات المبردة أو المجمدة نتيجة مشاكل بمخازن التبريد تمثل حوالي أربعة أضعاف التلف نتيجة مشاكل وسائل النقل. يبين الشكل ١,٨ إحدى وسائل عرض المواد المبردة في الأسواق الكبيرة، حيث تم تصميم ثلاجة العرض على

شكل رفوف وشكل جذاب وفي نفس الوقت المحافظة على درجة حرارة المواد المبردة (أو المجمدة) حتى تصل إلى يد المستهلك.



شكل ١,٨ ثلاجة عرض للمنتجات المبردة (www.coolfast.com).

١,٧ التبريد الأولي

تحتاج المنتجات إلى تبريد أولي قبل حفظها ثم نقلها إلى المستهلك، ولكن متى وأين يتم التبريد الأولي؟ يفضل في العموم تبريد المنتجات أوليا قبل بدء عملية الشحن، ويتم ذلك في أنفاق التبريد لضمان سرعة عملية التبريد وجودتها، نظرًا لصغر معدات التبريد في وسائل الشحن، حيث تعمل هذه المعدات فقط على تعويض الحرارة المكتسبة أثناء عملية الشحن. ويختلف الوضع في بعض الحالات الخاصة. فمثلا، يتم عمليا نقل الموز والليمون بدرجة حرارة الجو مباشرة إلى وسيلة النقل، حيث يتم التبريد أثناء عملية الشحن.

١,٨ الجمعيات والهيئات الدولية

هناك عدة جمعيات وهيئات دولية تعمل على وضع التشريعات والقواعد لعمل مخازن التبريد لضمان الأداء الأمثل لمكونات سلسلة التبريد. ومن هذه الجمعيات والهيئات على سبيل المثال وليس الحصر الآتي:

الاتحاد الدولي للمخازن المبردة International Association of Refrigerated Warehouses (IARW) ومقره مدينة الإسكندرية بولاية فيرجينيا بالولايات المتحدة الأمريكية. (http://www.iarw.org)

المنظمة العالمية لإمداد الغذاء The World Food Logistics Organization (WFLO) ومقرها مدينة الإسكندرية بولاية فيرجينيا بالولايات المتحدة الأمريكية. (http://www.iarw.org/wflo)

المعهد الدولي لتبريد الأمونيا The International Institute of Ammonia Refrigeration (IIAR) ومقره مدينة الإسكندرية بولاية فيرجينيا بالولايات المتحدة الأمريكية. (https://www.iiar.org)

الاتحاد الدولي للنقل المبرد The International Refrigerated Transportation Association (IRTA) ومقره مدينة الإسكندرية بولاية فيرجينيا بالولايات المتحدة الأمريكية. (http://www.irta.org)

الاتحاد الدولي لبناء مخازن التبريد The International Association for Cold Storage Construction (IACSC) ومقره مدينة الإسكندرية بولاية فيرجينيا بالولايات المتحدة الأمريكية. (http://www.iacsc.org)

الاتحاد الأوربي لمخازن التبريد والإمداد European Cold Storage and Logistics Association (ECSLA) ومقره بروكسل في بلجيكا. (http://www.ecsla.be)

الجمعية الأمريكية لمهندسي التدفئة والتبريد وتكييف الهواء American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) ومقرها مدينة أتلانتا بولاية جورجيا بالولايات المتحدة الأمريكية. (www.ashrae.org)

المعهد العالمي للتبريد International Institute of Refrigeration، باريس، فرنسا.

التحالف العالمي لسلسلة التبريد Global Cold Chain Alliance، (http://iarw.org/gcca)

وتقوم بعض هذه الجمعيات أيضا بتنظيم المؤتمرات الدولية والمعارض التي تهدف إلى التعرف على أحدث التقنيات المستخدمة في سلسلة التبريد، والتوعية بالمشاكل والتحديات التي تواجه صناعاتها المختلفة ووضع التوصيات اللازمة للتغلب عليها.

الفصل الثاني

مبادئ هندسة التبريد
بانضغاط البخار

٢,١ الدورة المثالية للتبريد بانضغاط البخار

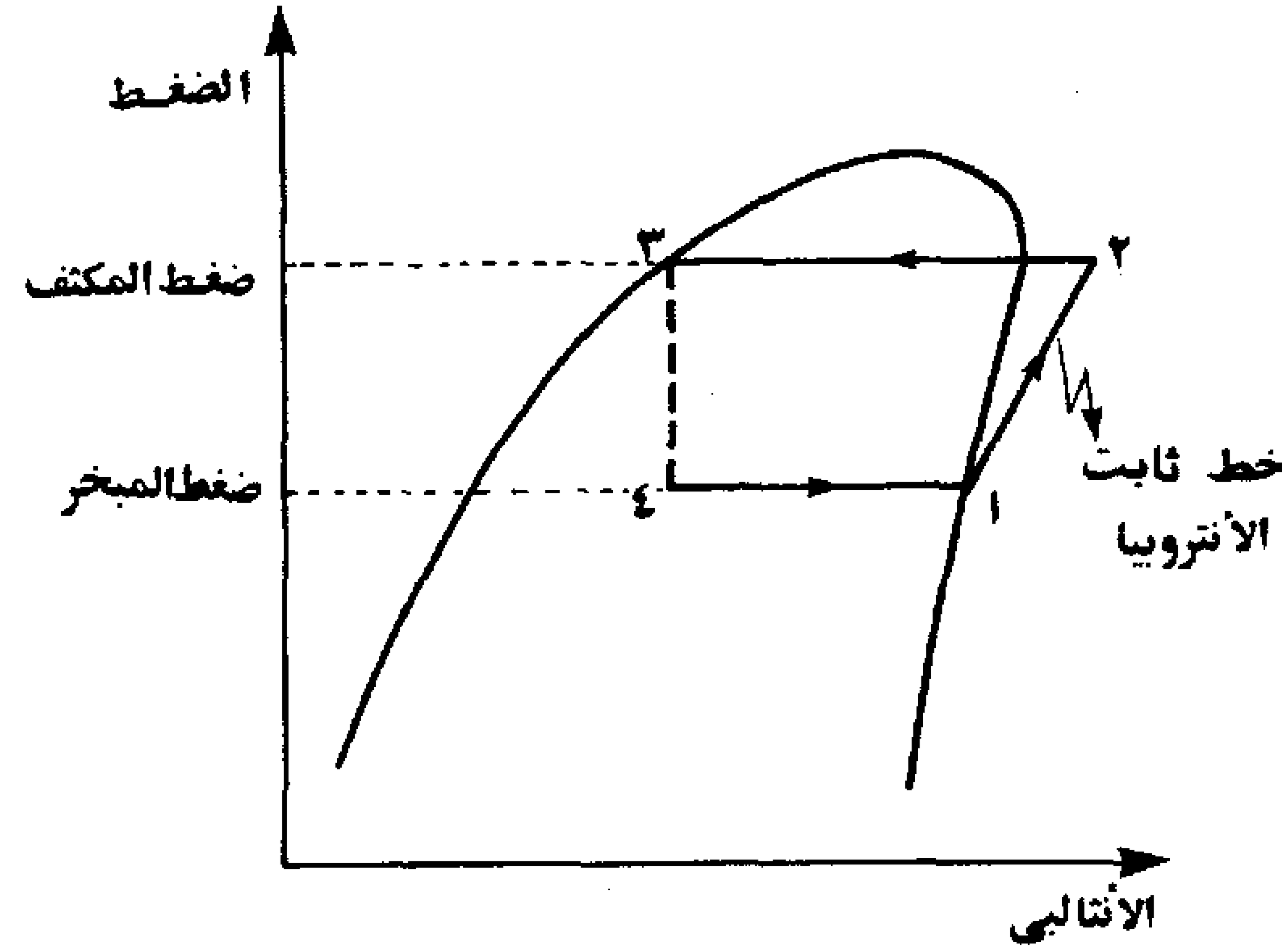
تتكون الدورة المثالية البسيطة للتبريد بانضغاط البخار من أربعة مكونات أساسية هي: المبخر، والضاغط، والمكثف، وصمام التمدد، كما هو مبين بشكل ٢,١. تعمل الدورة بمائع يعرف بالمبرد. ويتغير ضغط المبرد بين الضغط المنخفض بالمبخر والضغط العالي بالمكثف، وعليه تكون وظيفة الضاغط هي رفع ضغط بخار المبرد الخارج من المبخر عند الضغط المنخفض إلى الضغط العالي بالمكثف، بينما يقوم صمام التمدد بالعملية العكسية أي خفض الضغط لسائل المبرد الخارج من المكثف إلى ضغط المبخر. يعطي المبخر التأثير التبريدي للدورة عن طريق تبخير سائل المبرد الداخل إلى المبخر، مما ينتج عنه سحب حرارة من الحمل الحراري. أما المكثف فيعمل على طرد الحرارة وتكثيف بخار المبرد الخارج من الضاغط.

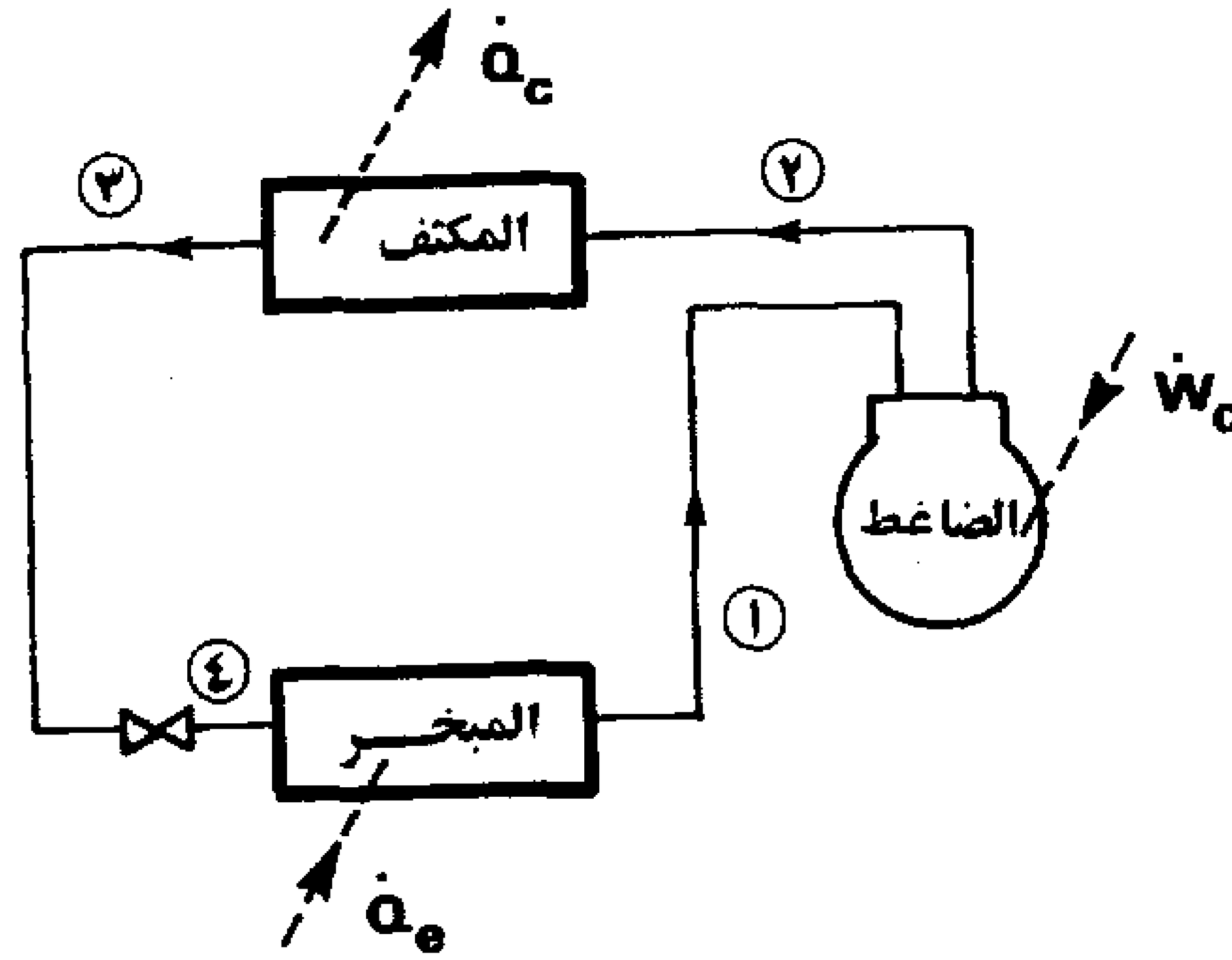
تتكون الدورة البسيطة المثالية للتبريد بانضغاط البخار من أربع عمليات مثالية. ويبين شكل ٢,١ تمثيل هذه العمليات على خريطة الضغط- الإنثالبي للمبرد المستخدم بالدورة. وبفرض أن النقاط ١ و٢ و٣ و٤ تمثل حالات اتزان ثرموديناميكي بين المكونات المختلفة بالدورة، فإن العمليات الأربعة بالدورة تكون عندئذ كما يلي :

العملية ١-٢: انضغاط رجعي (انعكاسي) بدون انتقال حرارة، أي انضغاط إيزنتروبي أو انضغاط ثابت الأنتروبيا.

العملية ٢-٣: طرد حرارة (التكثيف بخار المبرد) مع ثبات الضغط.

العملية ٣-٤: خنق سائل المبرد (وتعرف أيضًا هذه العملية بتمدد سائل المبرد)، أي خفض الضغط مع ثبات الإنثالبي.





شكل ٢,١ الدورة المثالية البسيطة للتبريد بانضغاط البخار (مكوناتها الرئيسية وتمثيلها على خريطة الانثالبي- الضغط).

العملية ٤-١: تبخير المبرد مع تبريد الوسط المحيط مع ثبات الضغط، وبالتالي الحصول على التأثير التبريدي.

لإيجاد قدرة الضاغط والحرارة المسحوبة في المبخر والحرارة المطرودة من المكثف، يتم عمل اتزان للطاقة (أي تطبيق القانون الأول للديناميكا الحرارية) لكل من الضاغط و المبخر و المكثف).

تقدر قدرة الضاغط تبعًا للعملية ١-٢ عالية كما يلي

$$\dot{W}_c = \dot{m}(h_2 - h_1) \tag{2.1}$$

حيث $\dot{m}$ هي معدل سريان المبرد بالدورة، و h هي إنثالبي المبرد عند الحالة المعنية. أيضًا يقدر معدل الحرارة المطرودة بالمكثف ومعدل الحرارة المكتسبة بالمبخر كما يلي، على التوالي

$$\dot{Q}_c = \dot{m}(h_2 - h_3) \tag{2.2}$$

$$\dot{Q}_e = \dot{m}(h_1 - h_4) \tag{2.3}$$

ومن القانون الأول للديناميكا الحرارية يلزم تحقق الآتي

$$\dot{W}_c = \dot{Q}_c - \dot{Q}_e \tag{2.4}$$

أو ما يعرف باتزان الطاقة للدورة. ويقيم أداء الدورة بمعامل الأداء COP الذي يعرف كنسبة معدل تبريد الحمل بالمبخر إلى قدرة الضاغط، أي إن

$$\text{COP} = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{W}_c} \tag{2.5}$$

وباستخدام معادلة (2.4) يمكن أيضًا أن يكتب معامل الأداء كما يلي:

$$\text{COP} = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{Q}_c - \dot{Q}_e} \tag{2.6}$$

ويفضل عادة مقارنة معامل أداء الدورة بمعامل أداء دورة كارنوت (Carnot) العكسية، وهي دورة مثالية، تعمل عند نفس ظروف دورة التبريد بانضغاط البخار

(أي عند نفس درجتي حرارة التبخر T_e والتكثف T_c) ولها أعلى معامل أداء يسمح به القانون الثاني للديناميكا الحرارية. ويعرف معامل أداء دورة كارنوت العكسية كما يلي

$$\mathrm{COP_c} = \frac{T_e}{T_c - T_e} \qquad (2.7)$$

حيث T_e و T_c هما على التوالي درجات الحرارة بالمبخر والمكثف بالدرجة المطلقة. عندئذ تعرف الكفاءة النسبية لدورة التبريد بانضغاط البخار بأنها النسبة بين COP للدورة و COP_c لدورة كارنوت العكسية التي تعمل عند نفس ظروف التشغيل، أي إن

$$\eta_r = \frac{\mathrm{COP}}{\mathrm{COP_c}} \qquad (2.8)$$

٢,٢ موائع التبريد (المبردات)

تحتاج دورة التبريد بانضغاط البخار التي قدمناها في الجزء السابق إلى مائع تبريد يسري بين مكوناتها المختلفة، ويكون بمثابة الدم في الكائن الحي، فيقوم بالعمليات المختلفة فى الدورة، وسنشير إلى مائع التبريد هذا باسم المبرد. ويعتمد اختيار نوع المبرد بنظام التبريد على التطبيق المستخدم به. ولقد قامت الجمعية الأمريكية لمهندسي التدفئة والتبريد وتكييف الهواء بتحديد حوالي أكثر من ٨٥ مبردًا تستخدم في صناعة التبريد [ASHRAE 2009] وتم وضع رقم مرجعي (كودي) لكل مبرد. وأكثر المبردات شيوعًا في صناعة التبريد هي مبردات الهالوكربونات، وهي الموائع التي أصلها هيدروكربونات ويدخل في تركيبها الكيميائي ذرة أو أكثر من الكلور، و/أو الفلور و/أو البرومين. وفي هذه المبردات يُحدد الرقم الكودي من ثلاثة أرقام: الرقم الأول على اليمين يمثل عدد ذرات الفلور في المبرد، والرقم

الثاني من اليمين يزيد بواحد عن عدد ذرات الهيدروجين في المبرد، أما الرقم الثالث من اليمين فيقل واحدًا عن عدد ذرات الكربون في المبرد، ويُهمل الرقم الثالث إذا كانت قيمته صفرًا. فمثلا أحادي كلوريد- ثنائي فلوريد الميثان ويرمز له كيميائيًا بالرمز $CHClF_2$ يكون رقمه المرجعي هو ٢٢، وعليه يعرف بمبرد ٢٢، أما ثلاثي كلوريد- ثلاثي فلوريد الميثان ويرمز له كيميائيًا بالرمز $CCl_2\ FCClF_2$ فيكون رقمه المرجعي هو ١١٣ ويعرف عندئذ بمبرد ١١٣. كما تستخدم في صناعة التبريد أيضًا بعض الموائع غير العضوية، ومن أهمها: الأمونيا، وثاني أكسيد الكربون، وثاني أكسيد الكبريت، والماء، والهواء، وغيرها. ويحدد الرقم المرجعي لهذه المبردات بطريقة مختلفة عن الهالوكربونات، حيث يضاف رقم ٧٠٠ إلى الوزن الجزيئي للمبرد. فمثلا الوزن الجزيئي للأمونيا هو ١٧، فيكون رقمها المرجعي هو ٧١٧، وتعرف الأمونيا عندئذ بمبرد ٧١٧، أما الماء فيعرف بمبرد ٧١٨ حيث إن وزنه الجزيئي يساوي ١٨.

وتعطى الخواص الحرارية للمبردات عادة في جداول بدلالة درجة الحرارة أو الضغط في منطقة التشبع، وبدلالة كليهما في منطقة التحميص (التسخين الفوقي). أيضًا تعطى هذه الخواص في خرائط الضغط - الإنثالبي لسهولة توقيع العمليات المختلفة لدورة التبريد على هذه الخرائط. ويعطي ملحق أ جداول الخواص وخرائط الضغط - الإنثالبي لمبرد ٢٢ ومبرد ١٣٤أ ومبرد ٧١٧ (الأمونيا) الشائعة الاستخدام في مخازن التبريد [ASHRAE 2009]. كما توجد برامج كمبيوتر لإيجاد خواص المبردات، مثل: إيبز [EES]، و برنامج رف بروب (Ref Prop) من نيست [NIST 2007].

مثال ٢,١

تعمل دورة للتبريد بانضغاط البخار، وتستخدم مبرد ٢٢، بين درجة حرارة مكثف قدرها ٣٠°م ودرجة حرارة مبخر قدرها -١٥°م. بفرض حالة التشبع للسائل

عند الخروج من المكثف وحالة التشبع عند الخروج من المبخر، احسب الآتي لكل كيلووات واحد تبريد في المبخر:

أ) معدل سريان حجم البخار الداخل إلى الضاغط.

ب) معدل طرد الحرارة من المكثف.

ج) معامل أداء الدورة.

د) الكفاءة النسبية للدورة.

الحل

ملحق أ يحتوي على خواص المبردات. باستخدام برنامج REFPROP8 من [NIST 2007] وباستخدام شكل ٢,١ والمعطيات المعطاة عاليه، نجد خواص مبرد ٢٢ عند النقاط المختلفة بالدورة كما يلي:

الحالة	درجة الحرارة مئوية	الضغط كيلوبسكال	الإنثالبي كيلوجول/كجم	الحجم النوعي م٣/ كجم
١	١٥-	٢٩٦,٢	٣٩٩,٢	٠,٠٧٧٥
٢	٥٣	١١٩١,٩	٤٣٤	
٣	٣٠	١١٩١,٩	٢٣٦,٦	
٤	١٥-	٢٩٦,٢	٢٣٦,٦	

ويمكن استخدام الجداول لتحديد جميع الخواص ما عدا الإنثالبي لنقطة ٢ والتي يمكن الحصول عليها من خريطة الضغط - الإنثالبي لمبرد ٢٢.

أ) يحسب معدل سريان كتلة المبرد في الدورة من معادلة (2.3) كما يلي

$$\dot{m}=\frac{1}{399.2-236.6}=0.00615\text{kg/s}$$

وعليه يحسب معدل سريان حجم البخار عند دخول الضاغط كما يلي

$$\dot{V}=\dot{m}\times v_1=0.00615\times0.0775=4.77\times10^{-4}\quad m^3/s$$

ب) يحسب معدل الحرارة المطرودة من المكثف كما يلي:

$$\dot{Q}_c=0.00615\times(434.-236.6)=1.214\quad kW$$

تحسب القدرة اللازمة لعملية الانضغاط كما يلي

$$\dot{W}_c=0.00615(434.-399.2)=0.214\quad kW$$

ج) ويقدر معامل أداء الدورة عندئذ كما يلي

$$COP=\frac{1}{0.214}=4.67$$

لدورة كارنوت تعمل بين −١٥°م و ٣٠° م فإن معامل أداء الدورة

$$COP_c=\frac{-15+273}{30-(-15)}=5.73$$

د) تحسب الكفاءة النسبية للدورة من معادلة (2.8) كما يلي

$$\eta_r=\frac{4.67}{5.73}=0.815$$

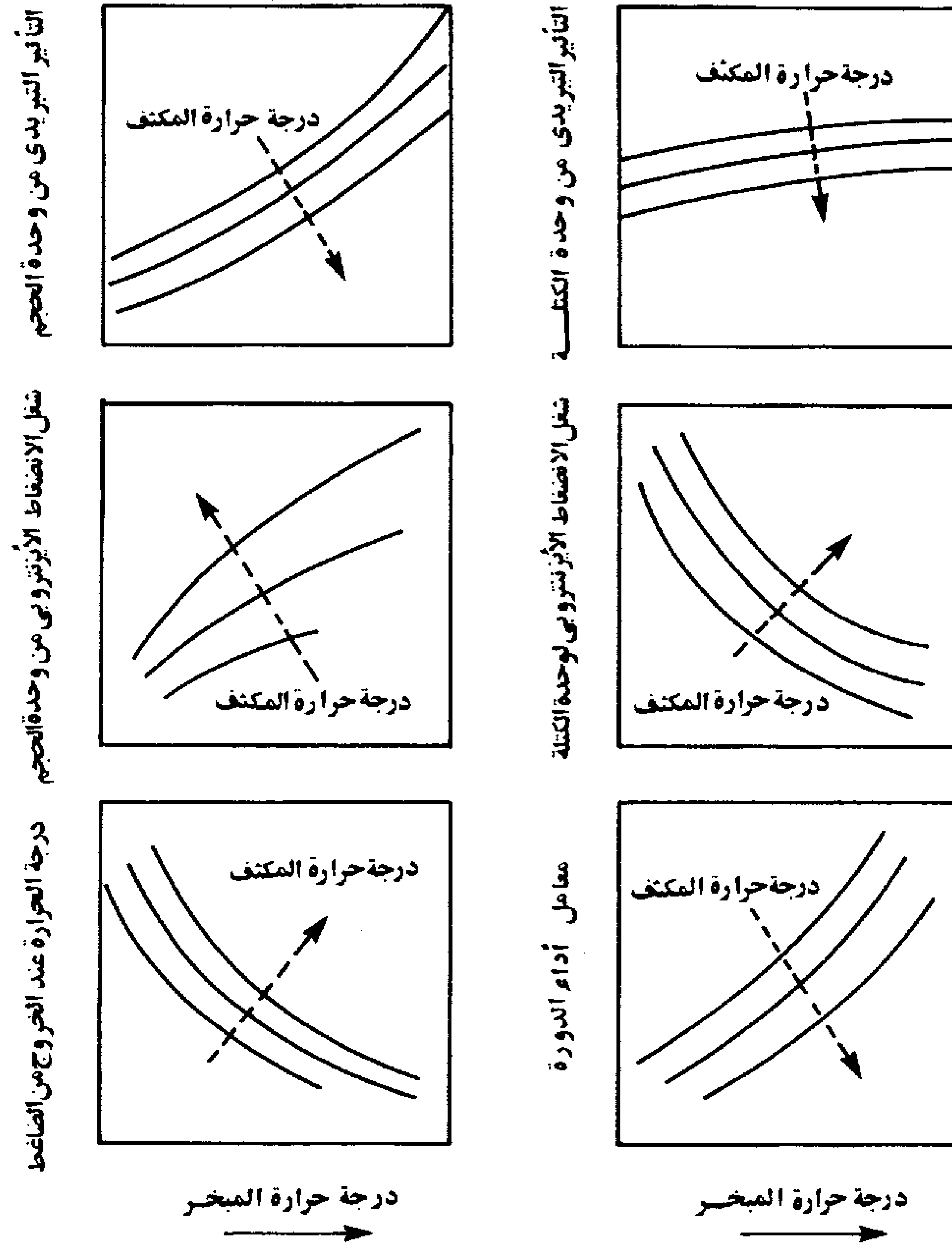
٢,٣ تأثير درجتي حرارة المكثف والمبخر على أداء الدورة المثالية

تؤثر درجتا حرارة المكثف والمبخر إلى حد كبير على أداء الدورة المثالية للتبريد بانضغاط البخار. وتتغير هاتان الدرجتان تبعًا للظروف الخارجية والداخلية لدورة التبريد. فتتغير درجة حرارة المكثف تبعًا لدرجة حرارة الهواء المحيط / الماء المستخدم في تبريد المكثف، وتتغير درجة حرارة المبخر تبعًا لدرجة حرارة الحمل الحراري للمبخر.

من شكل ٢,١ يقدر التأثير التبريدي لوحدة كتلة المبرد بالمبخر كما يلي

$$q_e=h_1-h_3 \qquad (2.9)$$

ومن خرائط الضغط – الإنثالبي للمبردات يتضح زيادة قيمة التأثير التبريدي لوحدة الكتلة بزيادة درجة حرارة المبخر (نظرًا لزيادة قيمة h_1) و/أو انخفاض درجة حرارة المكثف (نظرًا لانخفاض قيمة h_3)، انظر شكل ٢,٢.



شكل ٢,٢ تغير أداء دورة التبريد المثالية مع تغير درجة حرارة المكثف والمبخر بالدورة.

ويهتم مهندس التبريد عادة بحساب قيمة التأثير التبريدي لوحدة حجم البخار عند دخوله الضاغط، حيث يعتمد حجم الضاغط على حجم بخار المبرد الداخل إليه. عندئذ يقدر التأثير التبريدي لوحدة الحجم كما يلي

$$q_{e,v}=(h_1-h_3)/v_1 \qquad (2.10)$$

حيث v_1 هي الحجم النوعي للمبرد عند دخول الضاغط. وبحساب قيمة $q_{e.v}$ من العلاقة السابقة لمبردات مختلفة، وجد أيضًا أن هذه القيمة تزيد بزيادة درجة حرارة المبخر و/أو انخفاض درجة حرارة المكثف، انظر شكل ٢,٢، إلا أن الزيادة مع ارتفاع درجة حرارة المبخر تكون كبيرة نسبيًا نتيجة صغر قيمة v_l كلما ارتفعت درجة حرارة المبخر.

يعتبر شغل الانضغاط الأيزنتروبي عاملا آخر من العوامل التي تؤخذ في الاعتبار عند دراسة الدورة المثالية، حيث يمثل هذا الشغل تكلفة التشغيل. ويقدر شغل الانضغاط الأيزنتروبي لكل وحدة كتلة من المبرد، ولكل وحدة حجم عند دخول الضاغط، على التوالي، كما يلي

$$w = h_2 - h_1 \qquad (2.11A)$$

$$w_v = (h_2 - h_1)/v_1 \qquad (2.11B)$$

ويبين شكل ٢,٢ انخفاض قيمة w بزيادة درجة حرارة المبخر و/أو انخفاض درجة حرارة المكثف. ويبين الشكل أيضًا أن w_v يقل بانخفاض درجة حرارة المكثف ويزيد بزيادة درجة حرارة المبخر (التي تسبب صغر الحجم النوعي v_l).

يمثل معامل أداء دورة التبريد، المعرف بالمعادلة (2.5)، مقدار التبريد الذي تعطيه الدورة لكل وحدة من شغل الانضغاط. ويبين شكل ٢,٢ تغير معامل أداء الدورة مع تغير درجتي حرارة المبخر والمكثف، وكما هو مبين بالشكل يتحسن معامل الأداء بزيادة درجة حرارة المبخر و/أو انخفاض درجة حرارة المكثف.

أيضًا يهتم مهندسو التبريد بدرجة حرارة الخروج من الضاغط، حيث تمثل هذه الدرجة أعلى درجة حرارة بالدورة. وتعمل هذه الدرجة إذا زادت عن حد

معين على تحلل زيت التزييت بالضاغط. ويبين شكل ٢,٢ انخفاض هذه الدرجة بارتفاع درجة حرارة المبخر و/أو انخفاض درجة حرارة المكثف. ويعني هذا ارتفاع درجة الحرارة عند الخروج من الضاغط بشكل كبير إذا انخفضت درجة المبخر. لذا يلزم في تطبيقات التبريد التي تعمل عند درجة حرارة منخفضة نسبيًا، استخدام أكثر من مرحلة واحدة بالضاغط، مع تبريد البخار بين هذه المراحل، للحد من ارتفاع درجة حرارة بخار المبرد الخارج من المرحلة العليا بالضاغط.

مما سبق يتبين تحسن أداء دورة التبريد – بصفة عامة – بارتفاع درجة حرارة المبخر و/أو انخفاض درجة حرارة المكثف. لذا يجب على مهندسي التبريد تصميم نظام التبريد عند أعلى درجة حرارة ممكنة بالمبخر تبعًا للتطبيق المستخدم. كذلك، يجب العمل دائمًا على خفض درجة حرارة المكثف، ما أمكن، للحصول على أفضل أداء لدورة التبريد.

٢,٤ الحيود عن الدورة المثالية للتبريد بانضغاط البخار

تحيد الدورة الفعلية للتبريد بانضغاط البخار عن الدورة المثالية لعدة أسباب منها الآتي:

أ) انتقال الحرارة إلى المبرد في المواسير الواصلة بين المكونات المختلفة، بينما يفترض في الدورة المثالية استخدام عازل حراري مثالي لهذه الأنابيب.

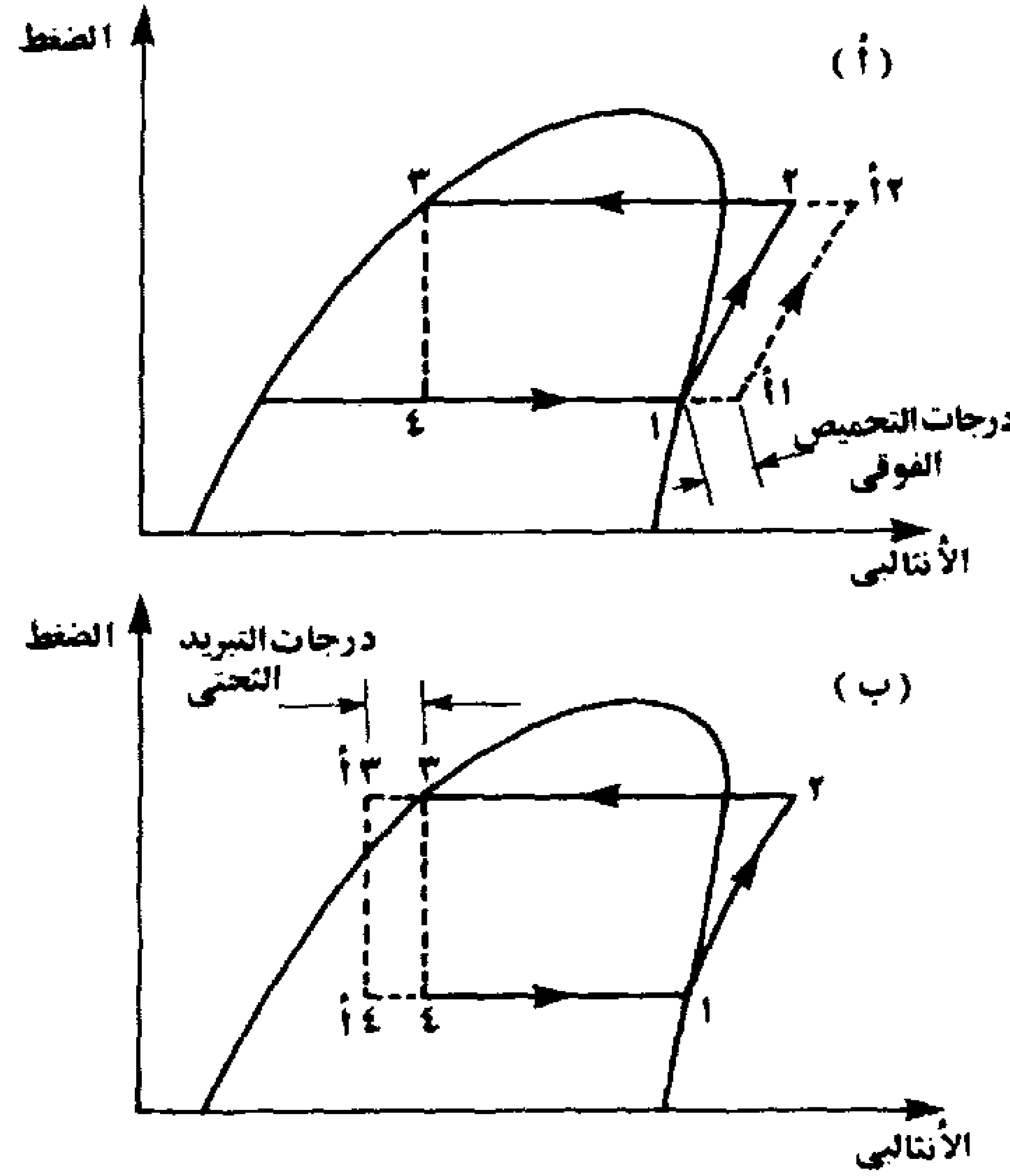
ب) فقد الضغط خلال سريان المبرد في الأنابيب الواصلة بين المكونات المختلفة، وخلال السريان داخل المكونات المختلفة للدورة.

ج) حيود عملية الانضغاط في الضاغط عن عملية الانضغاط المثالية.

وفي الأجزاء التالية نقدم حيود الدورة الفعلية للتبريد عن الدورة المثالية نتيجة كل سبب من الأسباب السابقة على حدة، ثم نتيجة الأسباب الثلاثة مجتمعة معًا.

٢,٤,١ انتقال الحرارة بين الجو المحيط وخطوط المبرد

يخرج بخار المبرد من المبخر عند درجة حرارة أقل من الجو المحيط مما يؤدي إلى انتقال الحرارة من الجو المحيط إلى بخار المبرد في خط السحب. وبفرض خروج بخار المبرد في حالة التشبع، فإن انتقال الحرارة إلى البخار يعمل على رفع درجة حرارته كما هو مبين بشكل ٢,٣ (الحالة أ). ويؤدي تسخين البخار قبل دخول الضاغط إلى العيوب الآتية:



شكل ٢,٣ مقارنة الدورة الفعلية للتبريد بانضغاط البخار بالدورة المثالية: (أ) تأثير التحميص الفوقي للبخار قبل دخول الضاغط، (ب) تأثير التبريد التحتي للسائل قبل دخول صمام التمدد.

أ) زيادة حجم البخار المسحوب بالضاغط، مما يعنى انخفاض معدل سريان كتلة المبرد التي يناولها الضاغط، أي انخفاض قيمة $\dot{m}$.

ب) زيادة قيمة شغل الانضغاط في الضاغط.

ج) ارتفاع درجة حرارة البخار الخارج من الضاغط (انظر الحالة أ بشكل ٢,٣) مما قد يؤدي إلى تحلل زيت التزييت المحمول مع بخار المبرد الخارج من الضاغط.

د) انخفاض سعة التبريد التي يعطيها الضاغط نظرًا لانخفاض قيمة $\dot{m}$ كما بينا في البند أ عاليه، وذلك بفرض أن انتقال الحرارة تم في خط السحب خارج المكان المطلوب تبريده.

هـ) انخفاض معامل أداء الدورة نتيجة البندين (ب) و(د) عاليه.

ويفضل عادة تحميص البخار قبل دخوله للضاغط، مما يعمل على حماية الضاغط من دخول بعض سائل المبرد إليه، فيسبب تلفه ميكانيكيًا. وعمومًا، يجب عزل خط السحب حراريًا لمنع انتقال الحرارة إليه للعيوب التي بيناها سابقًا. ويفضل أن يتم تحميص البخار بعدد محدود من درجات التحميص الفوقية داخل المبخر نفسه، لحماية الضاغط من دخول قطرات سائل المبرد إليه.

يتعرض خط الطرد من الضاغط إلى فقد حرارة من بخار المبرد الساخن (الغاز الساخن) إلى الجو المحيط. ويعمل هذا الفقد على تقليل الحمل الحراري للمكثف، مما يساعد على تصغير الحجم للمكثف. لذا يفضل عادة ترك هذا الخط عاريًا دون عزل حراري، إلا إذا خُشي من حدوث أي ضرر نتيجة لمس السطح الساخن لخط الطرد.

يمكن أيضًا للحرارة أن تنتقل بين الجو المحيط وسائل المبرد بخط السائل بين المكثف وصمام التمدد. وهناك احتمالان لانتقال الحرارة: إما أن تنتقل من سائل المبرد إلى الجو المحيط أو من الجو المحيط إلى سائل المبرد تبعًا لدرجة حرارة سائل المبرد ودرجة حرارة الجو المحيط. ففي حالة استخدام المكثفات المبردة بالهواء، تكون درجة حرارة سائل المبرد الخارج من المكثف أعلى عادة من درجة حرارة الجو المحيط بعدة درجات مئوية، مما يساعد على انتقال الحرارة من سائل المبرد بخط السائل إلى الجو المحيط، فيتم تبريده بعدة درجات من التبريد التحتي، كما هو مبين بشكل ٢,٣ (الحالة ب). ويؤدي هذا التبريد إلى زيادة قيمة التأثير

التبريدي بالمبخر مع المحافظة على معدل سريان المبرد ثابتًا، أي تحسين سعة التبريد بالدورة، وبالتالي تحسين معامل أداء الدورة. لذا يفضل في مثل هذه الحالة ترك خط السائل دون عزل حراري. أما في حالة استخدام المكثفات المبردة بالماء، فهناك احتمالان: الاحتمال الأول أن تكون درجة حرارة ماء التبريد مقاربة لدرجة حرارة الجو فيؤدي هذا إلى ارتفاع درجة حرارة سائل التبريد عن درجة حرارة الجو المحيط، وتنتقل الحرارة عندئذ من سائل المبرد إلى الجو المحيط، وينتج عن ذلك نفس النتائج التي قدمناها سابقًا عند استخدام المكثفات المبردة بالهواء. أما الاحتمال الثاني فينتج إذا كانت درجة حرارة ماء التبريد تقل، بدرجة ملحوظة، عن درجة حرارة الجو المحيط، مما يؤدي إلى انخفاض درجة حرارة سائل المبرد عند الخروج من المكثف عن درجة حرارة الجو المحيط. وتنتقل الحرارة حينئذ من الجو المحيط إلى سائل المبرد، مما يعمل على تبخير جزء منه. ويؤدي هذا، بالتالي، إلى العيوب الآتية:

أ) اضطراب أداء صمام التمدد حيث يعمل الصمام بصورة مرضية فقط إذا كان السريان لا يحوي بخارًا.

ب) تآكل مقعد صمام التمدد نتيجة مرور البخار به.

ج) انخفاض قيمة التأثير التبريدي بالمبخر نظرًا لتبخر جزء من المبرد قبل دخول المبخر.

د) انخفاض سعة التبريد بالدورة نتيجة البند (ج)، وبالتالي انخفاض قيمة معامل أداء الدورة.

في الأجزاء السابقة قدمنا تأثير انتقال الحرارة بين الجو المحيط وخطوط المبرد المختلفة، ويلاحظ هنا عدم الإشارة لخط المبرد الواصل بين صمام التمدد والمبخر نظرًا لقصر هذا الخط، حيث يوضع صمام التمدد أقرب ما يمكن من

المبخر، وفي بعض الأحيان يلغى هذا الخط كليا، فيوضع صمام التمدد مباشرة عند وصلة دخول المبخر.

٢,٤,٢ فقد الضغط في خطوط المبرد وفي المكونات المختلفة للدورة

ينتج عن سريان المبرد في الخطوط الواصلة بين المكونات المختلفة، وداخل المكثف والمبخر، فقدًا في الضغط نتيجة احتكاك السريان مع الأسطح المختلفة، ويؤدي هذا الفقد إلى حيود دورة التبريد عن الدورة المثالية، التي قدمناها فيما سبق. ويبين شكل ٢,٤ دورة التبريد الفعلية بعد أخذ فقد الضغط في الاعتبار (الرسم لا يعبر عن الفقد الفعلي لمقدار الضغط، وفقد الضغط بالرسم مبالغًا فيه للتوضيح فقط).

بسريان بخار المبرد خلال خط السحب ينخفض الضغط كما هو مبين بالشكل من الضغط P_1 إلى الضغط P_{1A}، كما يبين الشكل ٢,٤ فقد الضغط بسبب صمام السحب من ١أ إلى ١ب، ويتسبب هذا في العيوب الآتية:

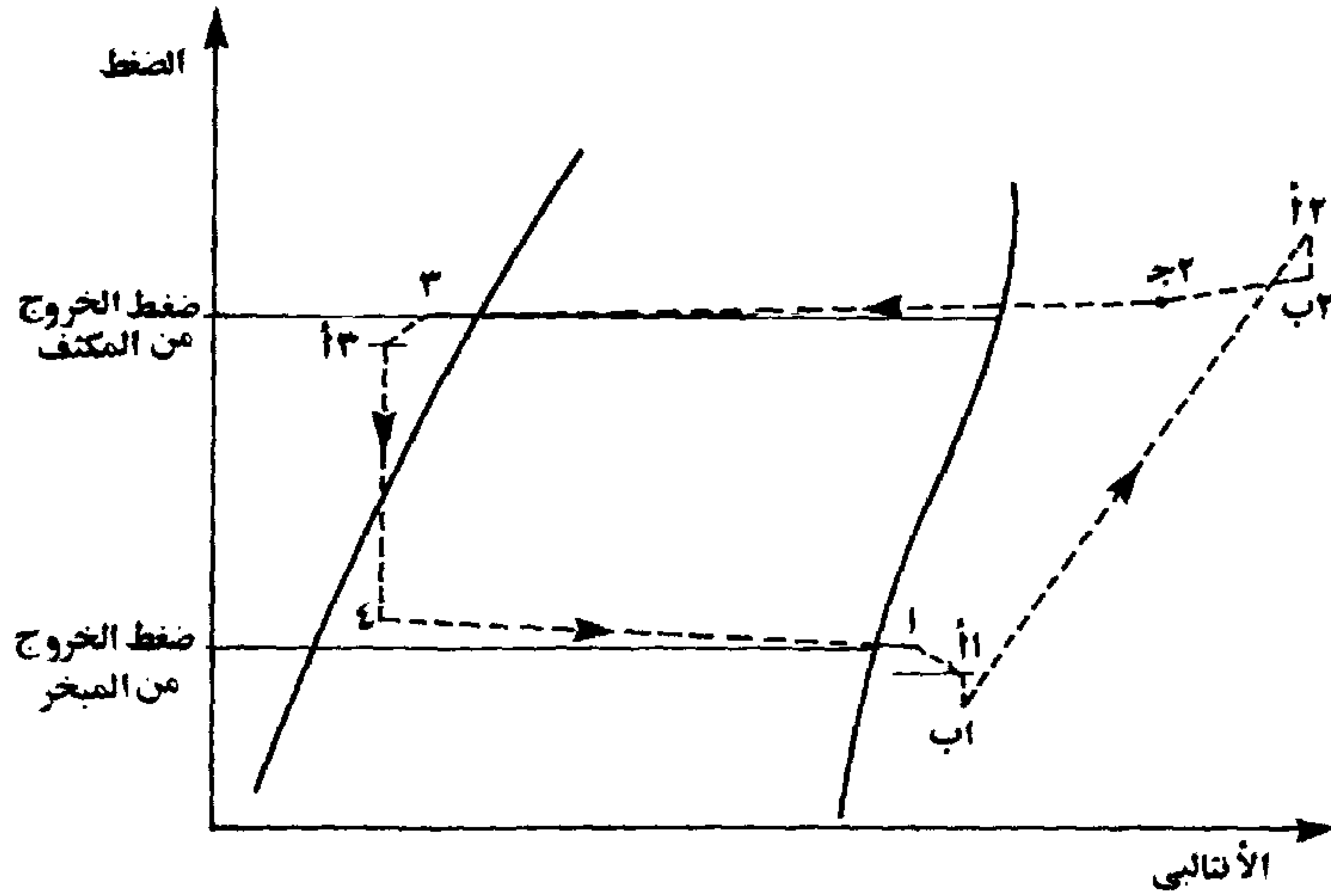
ا) ارتفاع قيمة الحجم النوعي لبخار المبرد عند دخول الضاغط، مما يعني انخفاض معدل السريان الذي يناوله الضاغط.

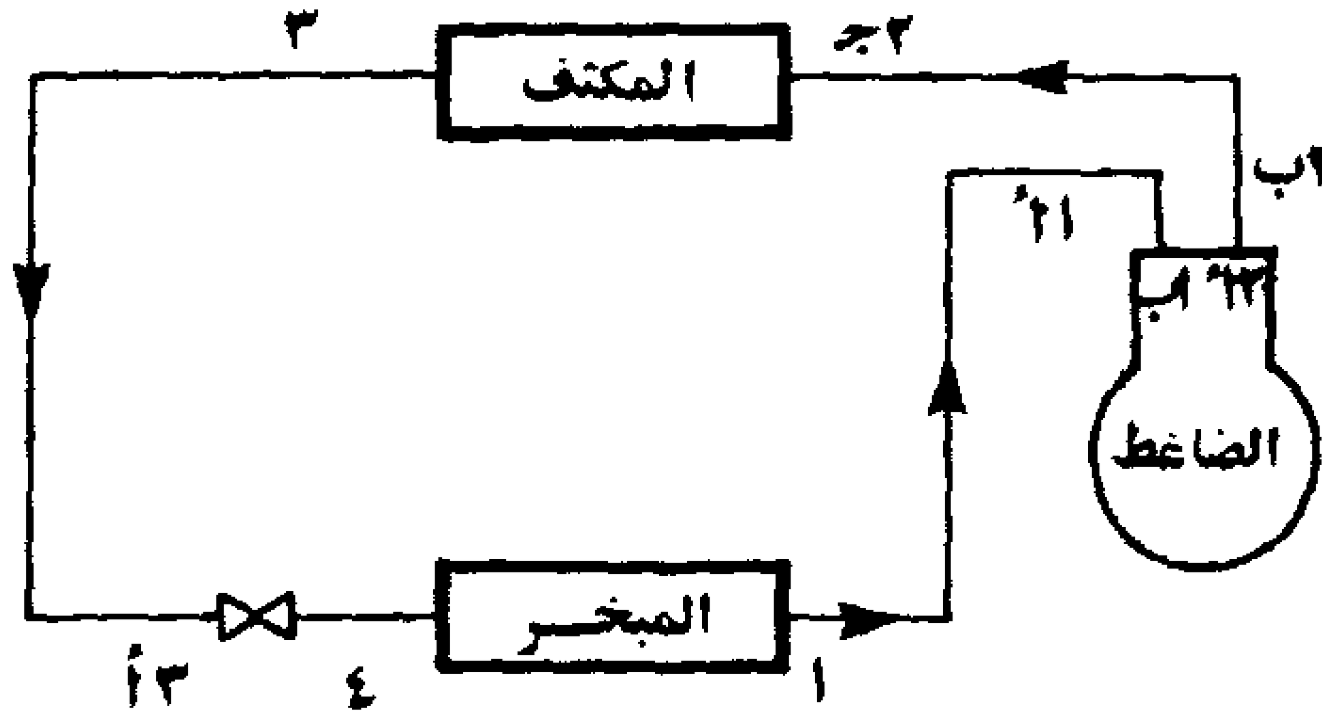
ب) انخفاض سعة تبريد الضاغط نتيجة السبب (أ) سابقًا.

ج) ارتفاع درجة حرارة بخار المبرد الخارج من الضاغط، مما قد يؤدي إلى تحلل زيت التزييت المحمول مع بخار الماء.

لذا يجب على المصمم العمل على خفض فقد الضغط في خط السحب للتخلص من العيوب السابقة. ويتم هذا بخفض سرعة بخار المبرد في خط السحب، إلا أن هذا يؤدي إلى عدم تمكن بخار المبرد من حمل زيت التزييت إلى الضاغط، مما يتطلب مرة أخرى رفع السرعة بخط السحب. ويعمل المصمم عندئذ على التوفيق بين مطلبي خفض فقد الضغط بخط السحب ورفع سرعة البخار بخط

السحب لحمل زيت التزييت، ويمكن الرجوع إلى جداول تصميم خطوط السحب لمزيد من التفصيل حول هذا الموضوع [ASHRAE 1986, 1990].





شكل ٢,٤ فقد الضغط في خطوط المبرد في المكونات المختلفة بدورة التبريد بانضغاط البخار.

يفقد الضغط قبل خروجه من الضاغط بسبب صمام الطرد من ٢أ إلى ٢ب، كما يفقد الضغط في خط الطرد من ٢ب إلى ٢ج، انظر الشكل ٢,٤.

يُفقد الضغط أيضًا في خط الغاز الساخن بين الضاغط والمكثف (انظر شكل ٢,٤). ويُهمل هذا الفقد في معظم نظم التبريد، حيث يوضع المكثف مباشرة بالقرب من الضاغط، مما يعني قصر طول هذا الخط. إلا أن بعض النظم تحوي مكثفات

على مسافة بعيدة نسبيًا من الضاغط مما يستلزم أخذ فقد الضغط بهذا الخط في الاعتبار. ويسبب فقد الضغط في خط الغاز الساخن العيوب الآتية:

أ) رفع ضغط الطرد بالضاغط مما يؤدي إلى زيادة الشغل اللازم لعملية الانضغاط، دون تغير معدل سريان المبرد خلال الضاغط.

ب) خفض معامل الأداء لدورة التبريد.

ج) رفع درجة حرارة بخار المبرد الخارج من الضاغط.

لهذه الأسباب يجب العمل على خفض فقد الضغط في خط الغاز الساخن ما أمكن، وإن كان هذا يتعارض عادة مع سرعة الغاز اللازمة لحمل زيت التزييت معه. لذا، ينصح أيضًا عند تصميم هذا الخط الرجوع إلى الجداول الخاصة بذلك [ASHRAE 1986, 1990].

يتعرض سريان المبرد في المكثف إلى فقد بالضغط، وإن كانت المكثفات تصمم عادة لخفض هذا الفقد، ويسبب فقد الضغط بالمكثف نفس العيوب السابقة التي يسببها فقد الضغط بخط الغاز الساخن. ويتراوح فقد الضغط في المكثف عادة بين ١٠ إلى ٢٠ كيلوبسكال.

يتعرض سريان المبرد أيضًا لفقد ضغط في خط السائل من المكثف (أو المستقبل) إلى صمام التمدد. ويسبب هذا انخفاض مقدار التبريد التحتي لسائل المبرد أو تبخر جزء منه، وذلك تبعًا لحالة المبرد الخارج من المكثف، وتبعًا لمقدار فقد الضغط. ففي الحالة المبينة بشكل ٢,٤ تسبب فقد الضغط بخط السائل في خفض الضغط من P_3 إلى P_{3A} ، مسببًا تبخر جزء من السائل (انظر حالة المبرد عند الحالة ٣أ مقارنة بالحالة ٣). ويسبب فقد الضغط في خط السائل العيوب الآتية:

أ) انخفاض ضغط دخول صمام التمدد، مما يؤدي إلى اضطراب أداء الصمام.

ب) في حالة تبخر جزء من المبرد قبل دخول صمام التمدد، يسبب البخار اضطراب أداء صمام التمدد، كما يسبب تآكل مقعد فتحة الصمام.

ولا يؤدي انخفاض الضغط بخط السائل إلى خفض معدل السريان إلى المبخر، حيث إن هذا الفقد كان سيحدث على أية حال في صمام التمدد إذا لم يحدث في خط السائل. لذا لا يهتم المصمم بفقد الضغط في خط السائل إذا كانت درجات التبريد التحتي للسائل الخارج من المكثف أو المستقبل كافية للتغلب على هذا الفقد، ومنع تبخر جزء منه.

يتعرض سريان المبرد أخيرًا لفقد في المبخر نفسه. بالطبع يُهمل عادة فقد الضغط في وصلة الأنابيب بين صمام التمدد والمبخر، نظرًا لقصر هذه الوصلة، ما لم يوجد موزع مبرد بين صمام التمدد والمبخر، عندئذ يعتبر فقد الضغط في الموزع مكملا لفقد الضغط في صمام التمدد، ولا يؤثر بأية حال على أداء دورة التبريد. ويسبب فقد الضغط في المبخر رفع درجة الحرارة المؤثرة في المبخر، وبالتالي يعمل هذا على رفع درجة حرارة الحمل الحراري. بمعنى آخر يجب على الضاغط العمل عند ضغط سحب أقل من ضغط السحب المناظر للدورة المثالية للحصول على نفس درجة الحرارة المؤثرة للمبخر (أي نفس درجة الحرارة للحمل الحراري)، مما يؤدي إلى زيادة شغل الانضغاط، وبالتالي انخفاض معامل أداء الدور. أيضًا، يؤدي هذا إلى زيادة حجم بخار المبرد عند سحب الضاغط، فينخفض معدل سريان المبرد بالضاغط، وبالتالي تنخفض سعة تبريده، وينخفض معامل أداء الدورة مرة أخرى. لذلك يجب تصميم المبخرات عند الحد الأدنى لفقد الضغط بها. ويقدر فقد الضغط بالمبخرات عادة بحوالي من ١٠ إلى ٢٠ كيلوبسكال.

٢,٤,٣ حيود عملية الانضغاط عن عملية الانضغاط المثالية

تتم عملية الانضغاط بالدورة المثالية بعملية أيزونتروبية، أي عملية أدياباتية انعكاسية. ويصعب عمليًا إجراء مثل هذه العملية لعدة أسباب، منها:

أ) وجود فقد ضغط بالسريان خلال صمامات السحب و/أو الطرد بالضاغط.

ب) وجود احتكاك بين السريان والسطح الداخلي بالضاغط، مما يمنع حدوث عملية انضغاط انعكاسية.

ويؤدي فقد الضغط في صمامي السحب والطرد بالضاغط، كما هو مبين بشكل ٢,٥ إلى:

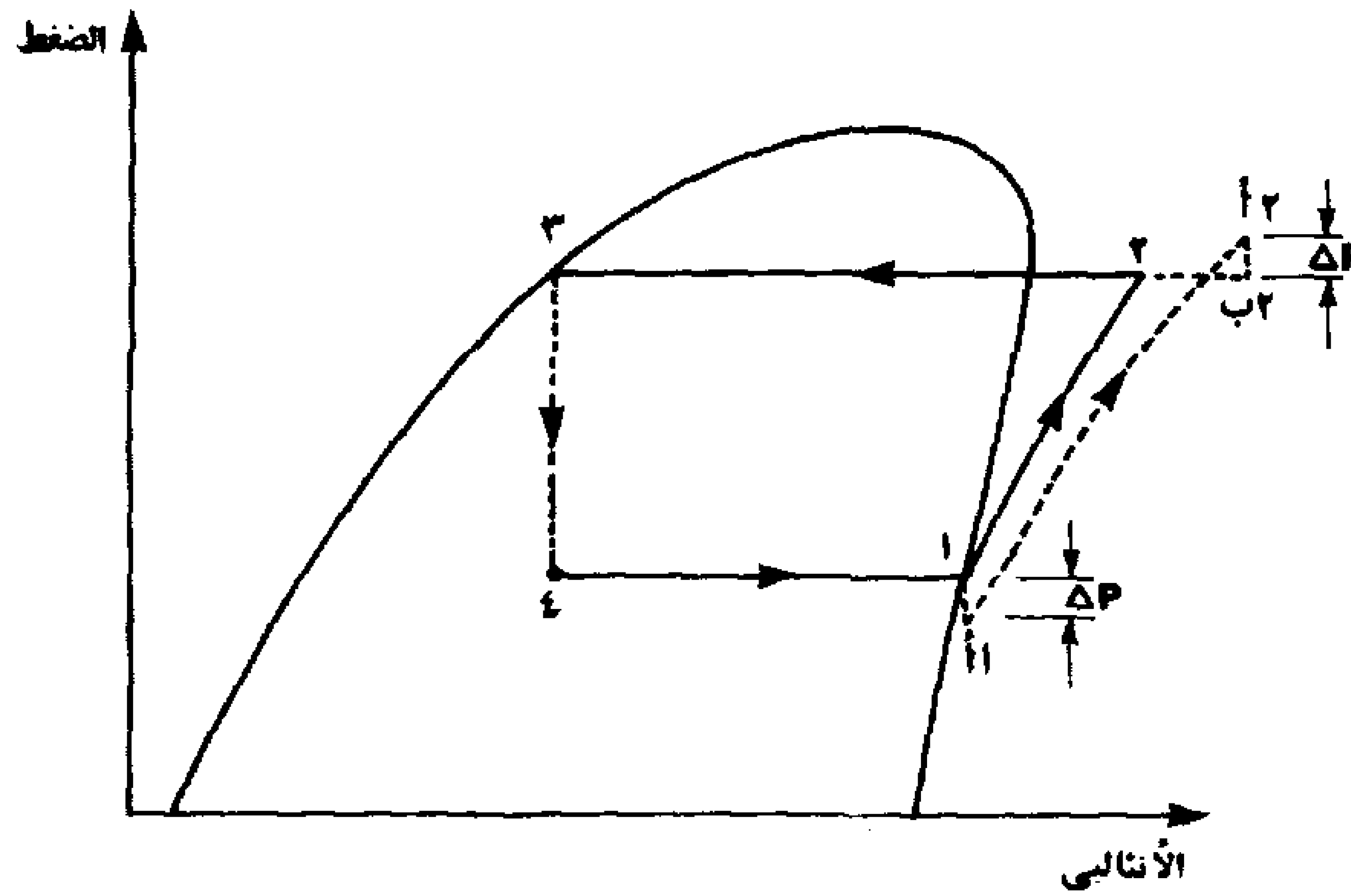
أ) زيادة حجم البخار الداخل إلى الضاغط (نتيجة كبر الحجم النوعي لبخار المبرد عند الحالة ١أ مقارنة بالحالة ١) وبالتالي خفض معدل سريان المبرد الذي يناوله الضاغط، أي خفض سعة تبريد الضاغط.

ب) زيادة شغل الانضغاط لكل وحدة كتلة يناولها الضاغط.

ج) ارتفاع درجة حرارة بخار المبرد الخارج من الضاغط.

ولقد ناقشنا تأثير هذه العيوب من قبل على أداء دورة التبريد في أجزاء سابقة من الفصل الحالي.

ويسبب الانضغاط اللاانعكاسي الأدياباتي، مقارنة بالانضغاط الانعكاسي الأدياباتي (قارن الخط ١–٢ والخط ١أ–٢أ في شكل ٢,٥)، إلى نفس العيبين (ب) و (ج) في الجزء السابق. ويحاول مصممو الضواغط الحد ما أمكن من فقد الضغط في صمامي السحب والطرد، ويمكن في بعض الضواغط الاستغناء كليا عن صمام السحب (كما هو الحال في الضواغط الدورانية والضواغط اللولبية وضواغط الطرد المركزي)، و/أو صمام الطرد (كما هو الحال في الضواغط الدورانية متعددة الريش، والضواغط اللولبية، وضواغط الطرد المركزي أيضا). كذلك يجتهد المصممون في العمل على اقتراب عملية الانضغاط من العملية الأيزونتروبية ما أمكن لتحسين أداء دورة التبريد.



شكل ٢,٥ حيود عملية الانضغاط عن العملية المثالية.

٢,٤,٤ الدورة الفعلية للتبريد بانضغاط البخار

بعد أخذ جميع الاعتبارات السابقة مجتمعة، يبين شكل ٢,٦ الدورة الفعلية للتبريد بانضغاط البخار موقعة على خريطة الضغط – الإنثالبي. من الشكل نلاحظ الآتي:

أ) انتقال الحرارة بين المبرد والجو المحيط خلال العمليات ١–١أ و ٢ب – ٢ج و ٣–٣أ.

ب) فقد الضغط في خطوط المبرد المختلفة، وكذلك في المكثف والمبخر.

ج) فقد الضغط في صمامي السحب والطرد بالضاغط، وكذلك حيود عملية الانضغاط عن العملية الانعكاسية.

ويوضح المثال التالي التحليل الحراري للدورة الفعلية للتبريد بانضغاط البخار.

مثال ٢,٢

أعد حل مثال ٢,١ بعد أخذ الآتي في الاعتبار:

أ) فقد ضغط قدره ٣٠ كيلوبسكال في كل من خط السحب، وصمام السحب، وصمام الطرد.

ب) فقد الضغط في خط الغاز الساخن = ٨٠ كيلوباسكال، ودرجة حرارة دخول الغاز الساخن=٦٠°م.

ج) فقد الضغط في المكثف = ٦٠ كيلوباسكال.

د) فقد الضغط في خط السائل = ١٢٠ كيلوباسكال.

هـ) فقد الضغط في المبخر = ٣٥ كيلوباسكال.

و) درجة حرارة بخار المبرد عند دخول الضاغط = -٥°م.

افرض خروج سائل المبرد وبخار المبرد من المكثف والمبخر على التوالي في حالتي التشبع، وافرض عزل خط السائل بين المكثف وصمام التمدد جيدا. أيضا، افرض أن ضغط المكثف عند الخروج = ١١٩١,٩ كيلوباسكال، وضغط المبخر عند الخروج = ٢٩٦,٢ كيلوباسكال، وأن عملية الانضغاط أيزونتروبية.

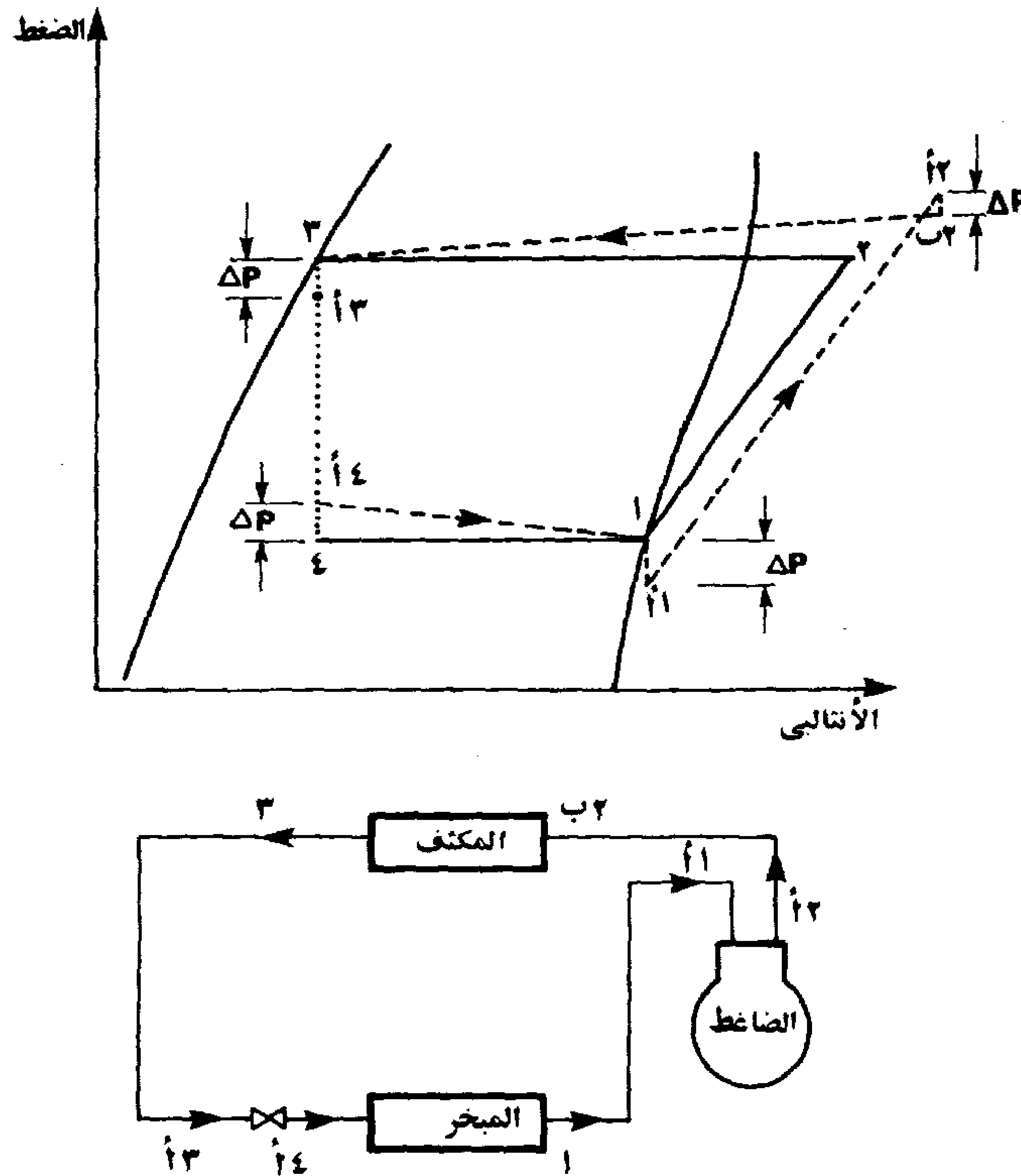
الحل

من المعلومات المعطاة، ومن جداول الضغط – الإنثالبي لمبرد ٢٢ في ملحق "أ"، يمكن رسم دورة التبريد الفعلية كما هو مبين في شكل ٢,٧، و لقد تم إيجاد الخواص عند الحالات المختلفة بالدورة كما هو مبين بجدول ٢,١. باستخدام برنامج REFPROP8 من [NIST 2007].

أ) يحسب معدل سريان كتلة المبرد في المبخر كما يلي

$$\dot{m}=\frac{1}{399.2-236.6}=0.00615 \quad kg/s$$

وهي نفس القيمة المعطاة بمثال ٢,١. يحسب معدل حجم البخار المسحوب بالضاغط كما يلي:



شكل ٢,٦ الدورة الفعلية للتبريد بانضغاط البخار.

$$\dot{V} = \dot{m}v_{1B} = 0.00615\text{x}0.1032 = 6.347\text{x}10^{-4} \quad m^3/s$$

وهو يزيد بحوالي ٣٦٪ عن الحجم المسحوب بالضاغط في الدورة المثالية بمثال ٢,١. لذا يلزم استخدام ضاغط أكبر بالدورة الفعلية للحصول على نفس سعة التبريد في المبخر.

ب) يحسب معدل طرد الحرارة من المكثف كما يلي

$$\dot{Q}_c = 0.00615(439 - 236.6) = 1.245 \quad kW$$

أي بزيادة قدرها ٣٪ فقط، وذلك نظرًا لتبريد خط الغاز الساخن بالجو المحيط. لاحظ هنا ارتفاع درجة حرارة الغاز الخارج من الضاغط إلى ٨٠ °م بدلاً

من ٥٣°م بالدورة البسيطة بمثال ٢,١. لذا يفضل في مثل هذه الدورة تبريد الضاغط أثناء التشغيل. ويتم هذا التبريد أما بالماء أو بالهواء.

جدول ٢,١ حل مثال ٢,٢ .

الحالة	درجة الحرارة °م	الضغط كيلوبسكال	الإنثالبي كيلوجول/كجم	الحجم النوعي م^٣ /كجم
١	-١٥	٢٩٦,٢	٣٩٩,٢	
١أ	-٥	٢٦٦,٢	٤٠٦,٦	
١ب		٢٣٦,٢	٤٠٦,٦	٠,١٠٣٢
٢أ	٨٠	١٣٦١,٩	٤٥٤,٣	
٢ب		١٣٣١,٩	٤٥٤,٣	
٢ج	٦٠	١٢٥١,٩	٤٣٩	
٣	٣٠	١١٩١,٩	٢٣٦,٦	
٣أ	٢٦	١٠٧١,٩	٢٣٦,٦	
٤	-١١,٩	٣٣١,٢	٢٣٦,٦	

ج) تحسب قدرة الانضغاط كما يلي

$$\dot{W} = 0.00615(454.3 - 406.6) = 0.294 \text{ kW}$$

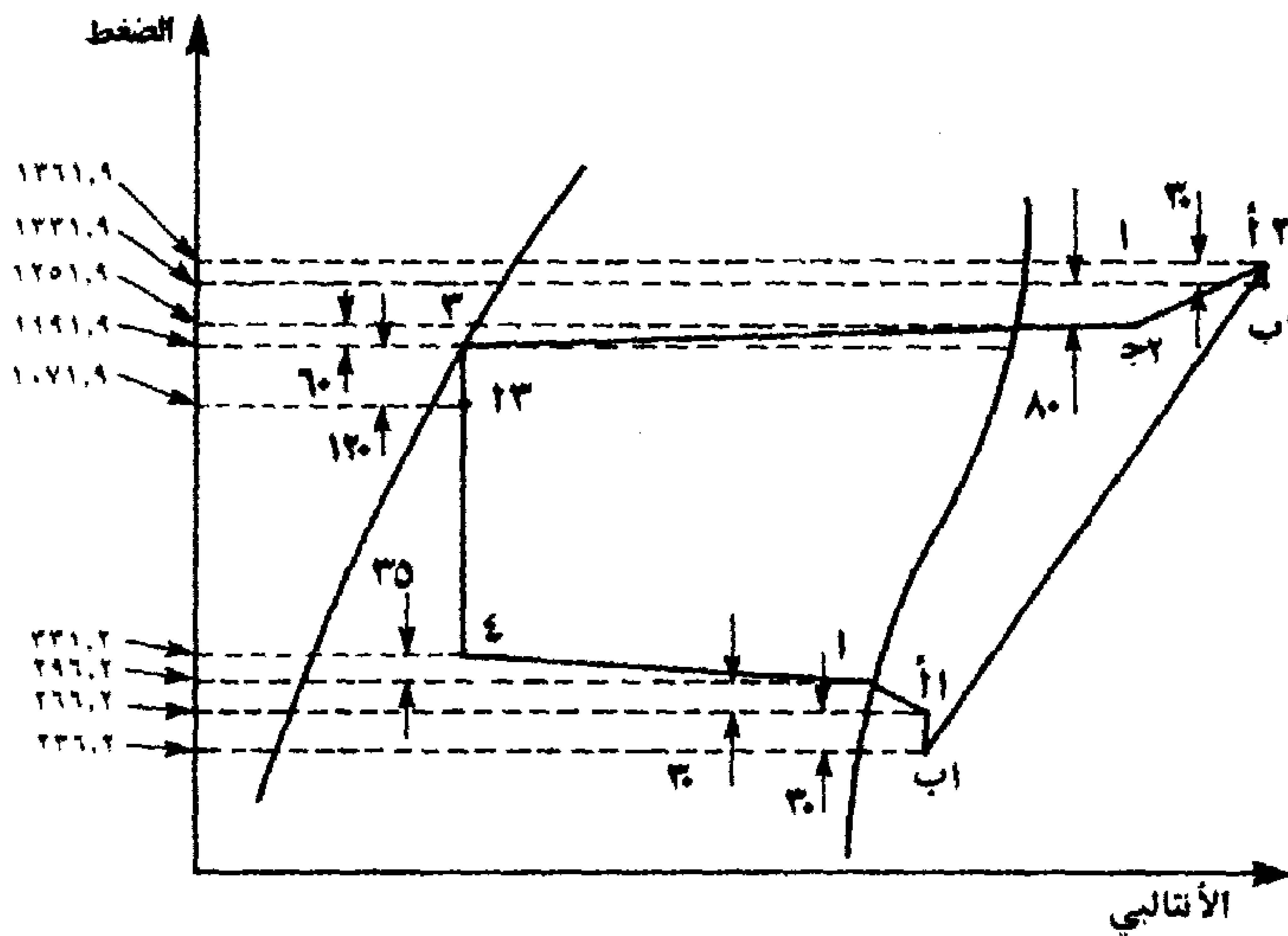
أي بزيادة قدرها حوالي ٥٢٪ عن الدورة المثالية للحصول على نفس سعة التبريد بالمبخر. ويقدر معامل الأداء عندئذ كما يلي

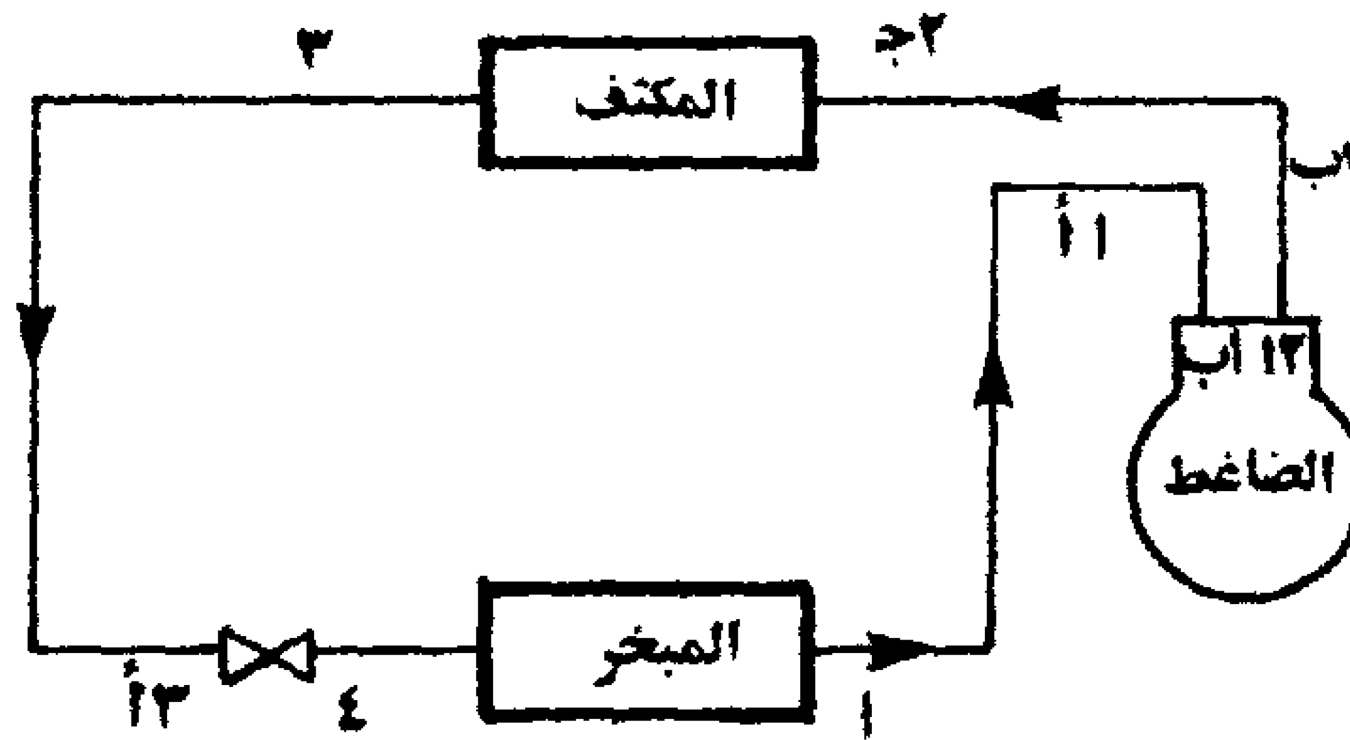
$$\text{COP} = \frac{1}{0.294} = 3.401$$

أي بنقص قدره ٢٨٪ عن الدورة المثالية. وتحسب الكفاءة النسبية كما يلي

$$\eta_r = 3.401 \times \frac{(30+15)}{(273-15)} = 0.594$$

ويلاحظ في الدورة الحالية وجود بخار عند دخول صمام التمدد عند الحالة "٣أ". ويعمل هذا البخار كما بينا سابقًا على اضطراب أداء صمام التمدد، وعلى تآكل مقعد الصمام. ولتفادي ذلك وجب تبريد المبرد تحتيًا بعد الخروج من المكثف لضمان دخول المبرد إلى الصمام في الحالة السائلة.





شكل ٢,٧ توقيع نقاط الحالات على خريطة الضغط – الانثالبي لمثال ٢,٢.

٢,٥ الأثر البيئي للمبردات

المبردات أو وسائط التبريد هي الموائع التي تعمل في دائرة التبريد فتتبخر في المبخر، ويتم ضغطها في الضاغط، وتتكثف في المكثف، وتتمدد في صمام التمدد، وتستمر هذا العملية طالما كانت دورة التبريد تعمل. ولذلك كان لزاما أن

يكون لهذه المبردات بعض الخصائص والميزات حتى تتم العمليات المختلفة بأعلى كفاءة، وأقل تكاليف ودون تأثيرات سلبية. ومن ضمن الخصائص التي يتطلع لها مهندس التبريد أن تكون متوفرة في مائع التبريد الآتي:

١- ألا تتغير خواص المبرد، سواء الفيزيائية أو الثيرموديناميكية أو غيرها، مع العمليات المختلفة من تبخير وتكثيف.
٢- أن تكون خواص المبرد ممتازة في نقل الحرارة، سواء في المكثف أو المبخر.
٣- أن يكون مأمون الاستخدام، فلا يحترق أو يساعد على الاشتعال، كما ألا يكون سامًا.
٤- أن يسهل اكتشاف تسربه.
٥- أن يكون متوفر ورخيص الثمن.
٦- ألا يسبب أي تفاعلات كيميائية أو غيرها مع أي من أجزاء مكونات الدائرة.

إن أكثر أنواع المبردات المستخدمة في دوائر التبريد هي المواد التي في أصلها مواد مركبات هيدروكاربونية (hydrocarbons) مثل الميثان (CH_4) والإيثان (C_2H_6) وغيرهما بعد استبدال كل أو بعض ذرات الهيدروجين بذرات كلور (chlorine) أو فلور (fluorine). وتسمى المركبات الهيدروكاربونية التي يتم إحلال جميع ذرات الهيدروجين فيها بذرات كلور أو فلور ب CFC أي (chlorofluorocarbons). وإذا استبدلت بعض ذرات الهيدروجين في المركب الهيدروكاربوني بذرات كلور أو فلور، فإن هذه المواد تسمى HCFC أي (hydrochlorofluorocarbons). أما إذا استبدلت بعض ذرات الهيدروجين في المركب الهيدروكاربوني بذرات فلور فقط فان المركب يسمى بـــ HFC أي (hydrofluorocarbon). وهناك مجموعات كثيرة من المبردات ناتجة عن خليط من مركب أو أكثر من CFC، و/أو HCHC، و/أو HFC.

فعلى سبيل المثال المبرد ١٢ (R-12) هو مركب CFC وصيغته الكيميائية هي CCl_2F_2، أما المبرد ٢٢ (R-22) فهو مركب HCFC وصيغته الكيميائية $CHClF_2$. والمبرد ١٣٤أ هو مبرد من نوع HFC وصيغته الكيميائية هي CH_2FCF_3. يبين جدول ٢,٢ بعضا من المبردات المشهورة وبعضا من خصائصها. يظهر في الجدول ٢,٢ مجموعة الأمان لكل مبرد. وقد اتفق على أن تكون مجموعة الأمان من حرف ورقم. فالحرف إما أن يكون A أو B. فالحرف A يعني أن المبرد غير سام، والحرف B يعني أن المبرد سام. أما الرقم فهو يعطي مستوى الاحتراق، بحيث الرقم ١ يعني أن المبرد لا يحترق، والرقم ٢ يعني أن مستوى الاحتراق للمبرد قليل، والرقم ٣ يعني أن مستوى الاحتراق عال. انظر الجدول٢,٣.

جدول ٢,٢ بعضًا من خواص بعض المبردات [ASHRAE 2009].

المبرد	النوع	الصيغة الكيميائية	درجة الغليان عند الضغط الجوي (°م)	مجموعة الأمان
مبرد ١١	CFC	CCl_3F	٢٤	A1
مبرد ١٢	CFC	CCl_2F_2	٣٠-	A1
مبرد ٢٢	HCFC	$CHClF_2$	٤١-	A1
مبرد ١٣٤أ	HFC	CH_2FCF_3	٢٦-	A1
مبرد ٧١٧	غير عضوي	NH_3	٣٣-	B2
مبرد ٤٠١أ	خليط	R22/R152a/R124 (53%,13%,34%)	-	A1
مبرد ٤٠٧أ	خليط	R32/R125,R134a (20%,40%,40%)	-	A1
مبرد ٥٠٠	خليط	R12/R152a (73.8%,26.2%)	٣٣-	A1
مبرد ٥٠٢	خليط	R22/R115 (48.8%,51.2%)	٤٥-	A1

جدول ٢,٣ مجموعات الأمان للمبردات [ASHRAE 2005].

B1	A1	لا يحترق
B2	A2	مستوى الاحتراق ضعيف
B3	A3	مستوى الاحتراق عالٍ
سام	غير سام	

ويضاف إلى هذه الميزات المرغوبة في المبرد و المذكورة أعلاه أن يكون المبرد صديقا للبيئة.

ومنذ الستينيات الميلادية، كانت تستخدم المبردات CFC، و HCFC بكثرة، غير أنه في السنوات الأخيرة (الثمانينيات الميلادية) وجد أن المبردات التي تحتوي على ذرات الكلور هي أحد الأسباب التي تؤدي إلى تآكل طبقة الأوزون، وهذه الطبقة تعتبر حزام أمان من الأشعة الضارة (فوق البنفسجية) حتى لا تصل إلى الأرض (http://ozone.unep.org). وفكرة تآكل طبقة الأوزون تتمحور حول أن ذرة واحدة من الكلور تحول الآلاف من ذرات الأوزون (O_3) إلى أوكسجين، وتحدث ما يسمى بثقب الأوزون، مما يعني وصول الأشعة الضارة إلى جو الأرض، مما يؤثر على الحياة عمومًا والإنسان والحيوان والنبات. وقد تم بالفعل الاتفاق على حظر المواد المسببة لثقب الأوزون وعمل جداول مجدولة زمانيا للحد تدريجيا، ومن ثم منع استخدام المواد الضارة بطبقة الأوزون. وأصبحت بروتوكولات مونتريال (١٩٨٩م) علامة فارقة في اتفاق دول العالم على المحافظة على البيئة في ما يخص المواد الضارة على طبقة الأوزون. وهناك ملاحق مختلفة من بروتوكولات مونتريال وتحديث للجداول الزمنية وخلافه تحت مظلة الأمم المتحدة (http://ozone.unep.org) كما يمكن الحصول على مزيد من المعلومات من وكالة حماية البيئة الأمريكية (http://www.epa.gov/ozone/index.html).

كما يندرج تحت التأثير البيئي أن بعض المواد تسبب الاحتباس الحراري تماما، مثل ثاني أكسيد الكربون، ولذلك فإن مبرد التبريد كي يكون صديقا للبيئة يجب ألا يكون له تأثير سيئ على طبقة الأوزون وألا يسبب احتباسا حراريا. ولسهولة تحديد تأثير مادة ما على طبقة الأوزون والاحتباس الحراري تم تطوير معامل تناقص الأوزون (ODP=Ozone Depletion Potential) ومعامل الاحتباس الحراري (GWP=Global Warming Potential). الجدول ٢,٤ يبين بعضا من المبردات المستخدمة في التبريد وقيمة المعاملين السابقين.

جدول ٢,٤ معامل التأثير على طبقة الأوزون ومعامل الاحتباس الحراري (www.epa.gov/ozone/index.html).

المبرد	معامل التأثير على طبقة الأوزون(ODP)	معامل الاحتباس الحراري(GWP)
مبرد ١١	١	٤٠٠٠
مبرد ١٢	١	٨٥٠٠
مبرد ٢٢	٠,٠٥	١٧٠٠
مبرد ١٣٤أ	٠,٠	١٣٠٠
مبرد ٤٠١أ	٠,٣٧	١١٠٠
مبرد ٤٠٧أ	٠,٠	١٦١٠
مبرد ٥٠٠	١,٠	٢٤٠٠
مبرد ٥٠٢	٠,٢٧٣	٤١

ونظرًا لأن المعاهدات الدولية تحظر استخدام بعض المبردات وتصنيعها، فإن على مهندس التبريد والتكييف أن يكون على علم ببدائل المبردات التي يتم حظرها. إضافة للإحاطة بالطرق الصحيحة والمتبعة لسحب وشحن المبرد عموما، وخصوصا تلك التي لها تأثير سيئ على البيئة. يعتمد اختيار بديل المبرد على التطبيق (درجات الحرارة في المبخر)، وعما إذا كان الهدف شراء نظام

جديد أم استبدال المبرد الموجود في مكائن التبريد الموجودة أصلا. الجدول ٢,٥ يبين بعضًا من المبردات وبدائلها (الوكالة الأمريكية لحماية البيئة).

جدول ٢,٥ بعض من بدائل المبردات المشهورة (الوكالة الأمريكية لحماية البيئة).

المبرد	البديل
مبرد ١٢	مبرد ١٣٤أ، مبرد ٤٠١أ، مبرد ٤٠١ب
مبرد ٢٢	مبرد ٤١٠أ، مبرد ٤١٠ب، آمونيا
مبرد ٥٠٠	مبرد ٤٠٦أ، ٤٢٠أ، GHG-X4، GHG-X5
مبرد ٥٠٢	مبرد ٤٠٧أ، مبرد ٤٠٧ب

الرموز ومعانيها للفصل الثاني

COP معامل أداء الدورة [−]

h الانثالبي [كجول/كجم] ، معامل انتقال الحرارة بالحمل [وات/(م٢.كلفن)]

$\dot{m}$ معدل التدفق [كجم/ث]

q كمية الحرارة النوعية [كجول/كجم]

$\dot{Q}$ معدل انتقال الحرارة [وات]

T درجة الحرارة [كلفن]

v الحجم النوعي [م٣/كجم]

$\dot{V}$ معدل السريان الحجمي [م٣/كجم]

$\dot{W}$ القدرة [وات]

التذييل

e المبخر

c المكثف أو الضاغط أو كارنوت

r تبريد

الحروف الإغريقية

η الكفاءة [−]

الفصل الثالث

خواص الهواء الرطب

٣,١ الهواء الجاف والهواء الرطب

يتكون الهواء الجوى من عدة غازات (نتروجين بنسبة ٥٣,٧٥٪ وأوكسجين بنسبة ٢٣,١٤٪، وأرجون بنسبة ١,٢٨٪ وكميات ضئيلة جدًا من الميثان وثاني أكسيد الكبريت، والهدروجين وغازات أخرى)، بالإضافة إلى بخار ماء وعدة مواد ملونة كالغبار والأدخنة وغيرهم.

والهواء الرطب هو مزيج ثنائي من الهواء الجاف وبخار الماء (المزيج الثنائي لا يمكن فصل مكوناته بالطرق الميكانيكية). وتتراوح كمية بخار الماء فى الهواء من صفر (يقال عندها أن الهواء جاف) إلى كمية قصوى تعتمد على درجة حرارة الهواء والضغط (يقال عندها أن الهواء مشبع بالرطوبة)، وفي حالة التشبع يكون الهواء فى حالة تعادل طبيعي مع سطح الماء. وحالة التعادل الطبيعي بين الهواء الرطب المشبع وسطح الماء المتكاثف الملامس له، تعنى أن ناتج تبادل البخار بينهما يساوي صفرًا، وأن الضغط الجزئي لبخار الماء فى الهواء يساوي ضغط بخار الماء الموجود فى طبقة رقيقة فوق سطح الماء.

٣,٢ نسبة الرطوبة ودرجة التشبع والرطوبة النسبية

تعرف نسبة الرطوبة W لعينة هواء رطب بأنها نسبة كتلة بخار الماء m_v الموجودة في عينة من الهواء الرطب إلى كتلة الهواء الجاف m_a في العينة، أي إن

$$W = \frac{m_v}{m_a} \tag{3.1}$$

بفرض أن الهواء الرطب عبارة عن خليط من غازين مثاليين هما الهواء الجاف وبخار الماء وأن ثابت الغاز للهواء الجاف (R_a=0.287 kJ/kg.K) وثابت الغاز لبخار الماء (R_v=0.462kJ/kg.K)، فإنه يمكن التعويض في معادلة الغاز المثالي ($pV=mRT$) مرتين لحساب نسبة الرطوبة (كجم ماء/كجم هواء جاف) بدلالة الضغط الجزئي p_v (كيلو بسكال) لبخار الماء في الهواء الرطب، ويكون الناتج كما يلي

$$W = 0.622 \frac{p_v}{p - p_v} \tag{3.2}$$

حيث p هو الضغط الكلي للهواء الرطب (كيلو بسكال). وعليه تعرف نسبة رطوبة التشبع W_s بأنها نسبة الرطوبة عند تشبع الهواء ببخار الماء، أي عندما يكون الهواء في حالة تعادل طبيعي مع سطح الماء، مما يؤدي إلى عدم انتقال بخار الماء إلى الهواء. ويكون الضغط الجزئي لبخار الماء في الهواء هو ضغط التشبع p_{ws} . ويعطى هذا الضغط (كيلو بسكال) بدلالة درجة الحرارة t (درجة مئوية) بالعلاقة الآتية (السيد وآخرون، ١٩٩٤م):

$$\log_{10} p_{ws} = -0.21254 + 3.13619\times10^{-2}t - 1.22512\times10^{-4}t^2 + 3.6384\times10^{-7}t^3 - 5.6707\times10^{-10}t^4 \tag{3.3}$$

وعليه يمكن إيجاد W_s باستخدام معادلة (3.2) كما يلي

$$W_s = 0.622 \frac{p_{ws}}{p - p_{ws}} \tag{3.4}$$

تعرف درجة التشبع μ للهواء الرطب بأنها نسبة رطوبة الهواء W مقسومة على نسبة رطوبة التشبع W_s عند نفس درجة الحرارة t والضغط الكلي p ، أي إن

$$\mu = \frac{W}{W_s}\Big|_{t,p} \tag{3.5}$$

وتعرف الرطوبة النسبية ϕ بأنها عبارة عن حاصل قسمة نسبة مولات بخار الماء في الهواء على نسبة مولات بخارالماء في الهواء عندما يكون الهواء مشبعًا أي إن

$$\phi = \frac{x_v}{x_{vs}} \tag{3.6}$$

حيث x_v هي نسبة مولات بخار الماء في الهواء، ويمكن إعادة كتابة المعادلة السابقة بفرضية أن كل من الهواء الجاف وبخار الماء عبارة عن غازين مثاليين، لنحصل على أن الرطوبة النسبية عبارة عن نسبة الضغط الجزئي لبخار الماء في الهواء إلى الضغط الجزئي لبخار الماء عند تشبع الهواء عند نفس درجة الحرارة t والضغط الكلى p ، أي إن

$$\phi = \frac{p_v}{p_{ws}}\Big|_{t,p} \tag{3.7}$$

حيث يمكن أن تحسب p_{ws} من معادلة (3.3).

٣,٣ درجات حرارة الهواء الرطب

تعرف درجة الحرارة t التي يمكن قياسها بثرمومتر جاف البصيلة، بدرجة حرارة البصيلة الجافة، وهي درجة الحرارة المعتادة. فإذا قيل إن هناك هواء رطبا عند ٣٠°م، كان المقصود أن درجة حرارة البصيلة الجافة هي ٣٠°م. وتعرف درجة حرارة نقطة الندى t_{dp} لهواء رطب بنسبة رطوبة W بأنها درجة حرارة الهواء المشبع ببخار الماء الذي له نفس نسبة الرطوبة W و الضغط الكلي p ، أي إن

$$W_s(p, t_{dp}) = W \tag{3.8}$$

وتحسب درجة حرارة نقطة الندى t_{dp} (درجة مئوية) من العلاقة الرياضية الآتية [ASHRAE 1993]:

$$0^\circ C \langle t_{dp} \langle 93^\circ C:$$
$$t_{dp} = 6.54 + 14.526 \ln p_v + 0.7389(\ln p_v)^2 + 0.09486(\ln p_v)^3 + 0.4569(p_v)^{0.1984}$$
$$t_{dp} \langle 0^\circ C:$$
$$t_{dp} = 6.09 + 12.668 \ln p_v + 0.4959(\ln p_v)^2 \quad (3.9)$$

حيث p_v (كيلو بسكال) هو الضغط الجزئي لبخار الماء في الهواء ويحسب من معادلة (3.2) بدلالة الضغط الكلي p للهواء الرطب ونسبة الرطوبة به W.

وتعرف درجة حرارة البصيلة المبتلة t^* لهواء رطب بأنها درجة الحرارة التي يسجلها ثرمومتر مبلل البصيلة. وتعتمد هذه الدرجة على نسبة الرطوبة W بالهواء ودرجة حرارته t (أي درجة حرارة البصيلة الجافة). وتكون درجة حرارة البصيلة المبتلة t^* دائما أقل من درجة الحرارة t، وتقترب t^* من t بارتفاع نسبة الرطوبة W. أما إذا أصبح الهواء مشبعًا، أي عندما تكون نسبة الرطوبة W_s تساوت t^* و t.

٣,٤ كثافة وانثالبى الهواء الرطب

تعرف كثافة الهواء الرطب ρ (كجم/م^٣^) بأنها الوزن الكلي لعينة من الهواء الرطب مقسوما على الحجم الكلي للعينة، أي إن

$$\rho = \frac{m_a + m_v}{V} = \rho_a (1 + W) \quad (3.10)$$

حيث ρ_a هي كثافة الهواء الجاف (كجم/م^٣^) و تحسب كما يلي

$$\rho_a = \frac{(p - p_v)}{R_a (t + 273)} \quad (3.11)$$

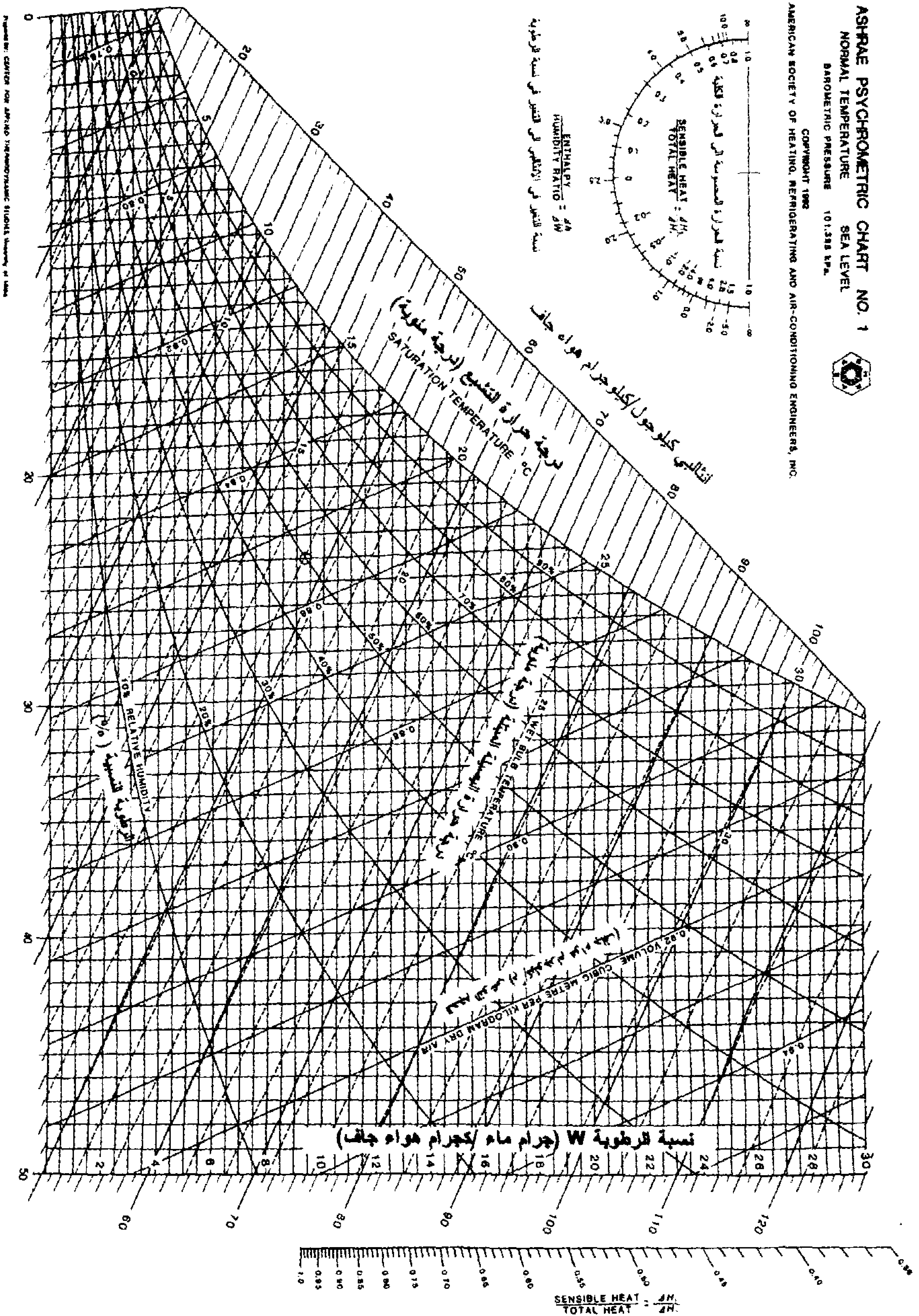
حيث R_a هي ثابت الغاز للهواء (=٢٨٧,. كيلوجول/كم. درجة مطلقة) و t هي درجة حرارة البصيلة الجافة للهواء (درجة مئوية) و p_v و p كما سبق تعرفيهما.

يمكن التعبير عن انثالى الهواء الرطب باستخدام علاقات الغاز المثالي كما يلي:

$$h = t + W(2501 + 1.805t) \quad (3.12)$$

٣,٥ خريطة السيكروميتري

لتسهيل حسابات خواص الهواء الرطب تم رسم خريطة تربط هذه الخواص بعضها مع البعض تسمى خريطة السيكرومتري (شكل ٣,١). و يمكن استخدام هذه الخريطة بطريقة أسرع وأيسر لإيجاد قيم خواص الهواء الرطب، كما تتيح فهما أكثر للعمليات التي يتم إجرائها على الهواء. لاحظ أنه تم إعداد كل خريطة سيكرومتري لضغط جوي معين، لذلك وجب اتخاذ الحيطة عند استخدام خريطة السيكرومتري من أن تكون للضغط المناسب. يمكن أيضا ملاحظة وجود منقلة على يسار خريطة السيكرومتري. ويوجد لهذه المنقلة تدريجان أحدهما داخلي والآخر خارجي. والتدريج الداخلي هو عبارة عن نسبة الحرارة المحسوسة إلى الحرارة الكلية، والتدريج الخارجي هو عبارة عن نسبة تغير الانثالبي Δh إلى تغير نسبة الرطوبة ΔW. ويتم استخدام هذان التدريجان كثيرًا في تحليل ودراسة العمليات المختلفة لمعالجة الهواء الرطب. فمثلا لتحديد ورسم خط على خريطة السيكرومتري له قيمة تساوي ٠,٧ لنسبة الحرارة المحسوسة إلى الحرارة الكلية، يتم استخدام التدريج الداخلي برسم خط من قيمة ٠,٧ إلى مركز المنقلة. ويمثل هذا الخط نسبة حرارة المحسوسة إلى حرارة كلية قدره ٠,٧. وباستخدام مثلث قائم الزاوية ومسطرة يمكن نقل هذا الخط إلى أي مكان على خريطة السيكرومتري. وكذلك الحال لمن أراد استخدام التدريج الخارجي لرسم خط له ميل معين لـ $\Delta h / \Delta W$. يلاحظ وجود تدريج آخر لنسبة الحرارة المحسوسة إلى الحرارة الكلية على يمين تدريج نسبة الرطوبة W وهذا التدريج يستخدم فقط مع نقطة واحدة تظهر كدائرة صغيرة عند درجة حرارة ٢٤ °م ورطوبة نسبية ٥٠٪، و تسمى هذه النقطة بنقطة المحاذاة.



شكل ١،٣ خريطة خواص الهواء الرطب (السيكرومتري) عند ضغط ١ جوي [ASHRAE 2005].

٣,٦ العمليات الأساسية المستخدمة فى تكييف الهواء

فيما يلي نقدم أهم العمليات الأساسية المستخدمة فى تكييف الهواء:

يمثل شكل ٣,٢ أولى العمليات، وهي عملية الخلط الادياباتي للهواء الرطب. ويلاحظ أن تيار الهواء الأول عند نقطة ١ بمعدل سريان $\dot{m}_1$ و نسبة رطوبة W_1 وانثالبي h_1 يختلط بتيار الهواء الثاني عند نقطة ٢ ومعدل سريانه $\dot{m}_2$ ونسبة الرطوبة به W_2 وقيمة الانثالبي له h_2 لينتج من عملية الخلط تيار ثالث معدل سريانه $\dot{m}_3$ ونسبة الرطوبة به W_3 و قيمة الانثالبي له h_3. ويمكن كتابة المعادلات الخاصة بتوازن كتلة الهواء وتوازن كتلة بخار الماء وتوازن الطاقة للهواء كالآتي

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_1 + \dot{m}_2$$

$$\dot{m}_3 W_3 = \dot{m}_1 W_1 + \dot{m}_2 W_2$$

$$\dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2$$

ويمكن اختزال المعادلات السابقة إلى الصورة الآتية:

$$W_3 = \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2} W_1 + \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2} W_2 \qquad (3.13)$$

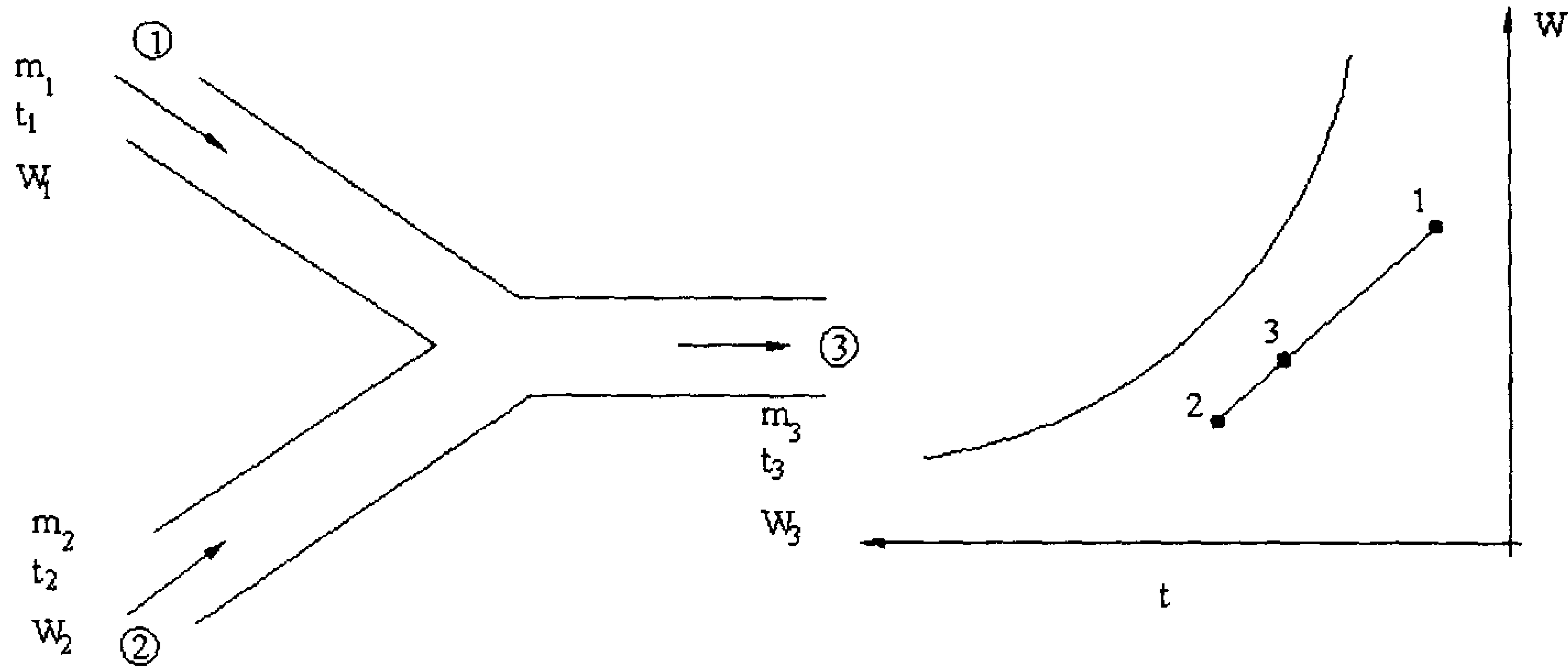
$$h_3 = \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2} h_1 + \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2} h_2 \qquad (3.14)$$

وهى تعني أن النقطة ٣ تقسم المسافة بين النقطتين ١ و ٢ بالنسبة العكسية لمعدلات السريان كما هو واضح من شكل ٣,٢.

تمثل العملية أ بشكل ٣,٣ حالة تسخين محسوس، بينما تمثل العملية ب بالشكل حالة تبريد محسوس. وخلال عملية التبريد أو التسخين المحسوس تكون نسبة الرطوبة ثابتة، وتزيد كل من درجة الحرارة الجافة والمبتلة والانثالبي وتقل الرطوبة النسبية في حالة التسخين المحسوسة، والعكس في حالة التبريد المحسوس.

ويمكن حساب كمية الحرارة المضافة إلى الهواء أو المسحوبة منه من المعادلة الآتية

$$\dot{Q} = \dot{m}(h_2 - h_1) \tag{3.15}$$

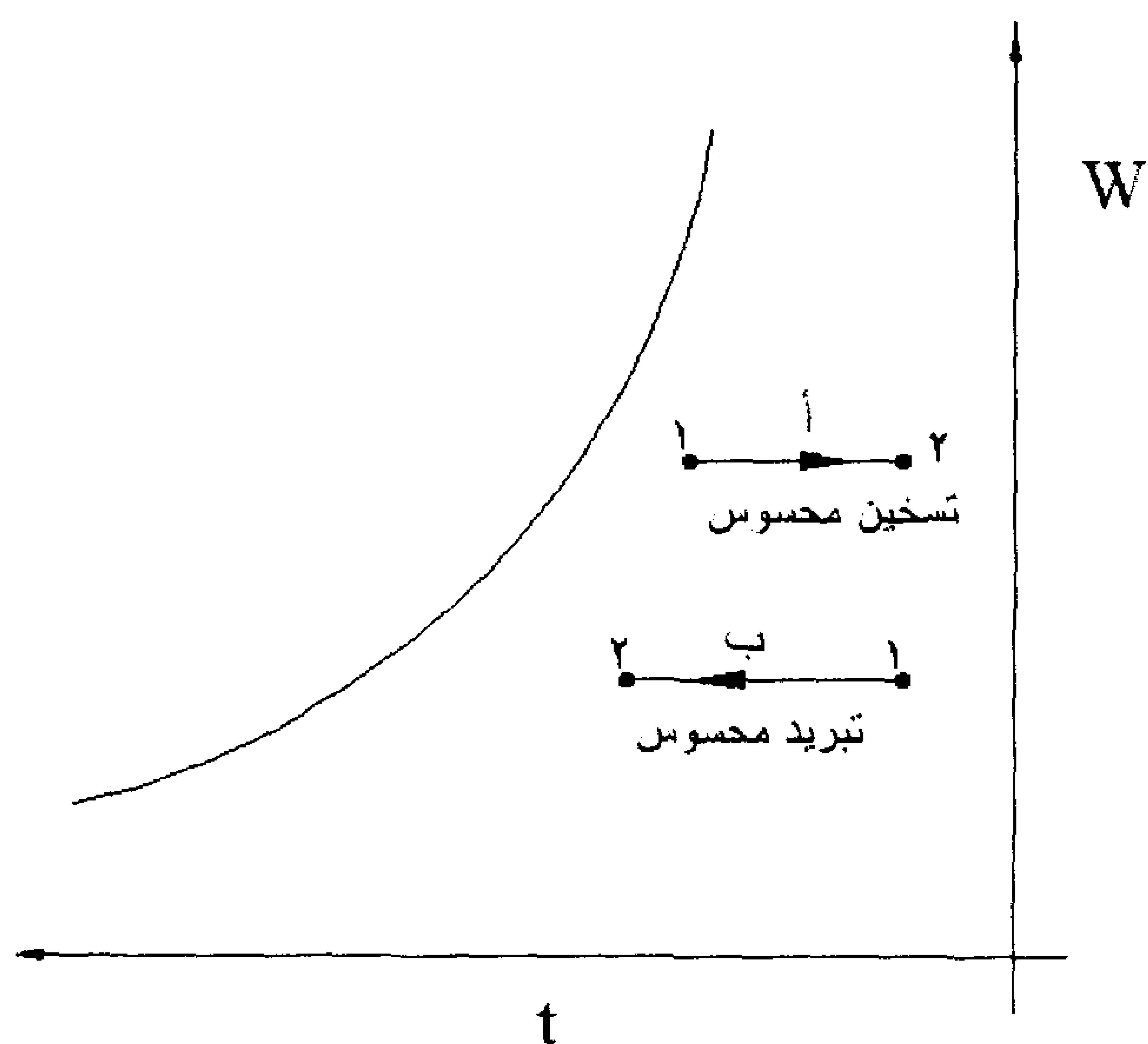


شكل ٣,٢ عملية الخلط ادياباتيا وتمثيلها على خريطة الهواء الرطب.

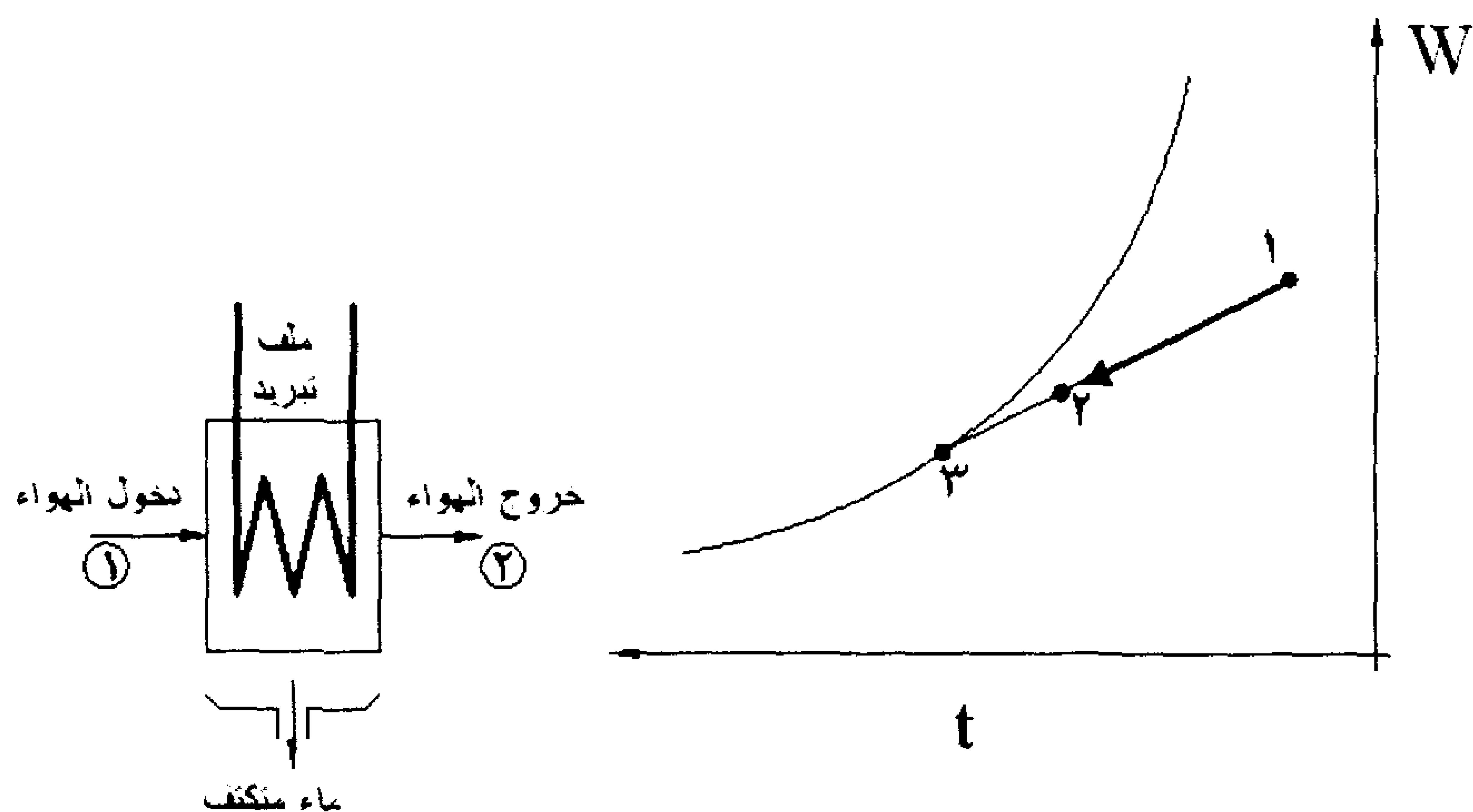
في العملية الثالثة ندرس تبريد الهواء مع إزالة الرطوبة. عند مرور الهواء الرطب على سطح ملف تبريد يتكثف بخار الماء منفصلا عن الهواء إذا كان متوسط درجة حرارة سطح ملف التبريد أقل من درجة حرارة نقطة الندى للهواء الرطب. وتمثل عملية إزالة الرطوبة بالتبريد على خريطة الهواء الرطب بالخط ١-٢ في شكل ٣,٤. وعند مد هذا الخط ليقابل خط التشبع (١٠٠٪ رطوبة نسبية) في خريطة الهواء الرطب فإن نقطة التقاطع – النقطة ٣ – تمثل متوسط درجة حرارة سطح ملف التبريد، ويطلق عليها أيضا اسم نقطة الندى لملف التبريد. ويعرف معامل التلامس للملف بالمعادلة الآتية:

$$C = \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t_3} = \frac{W_1 - W_2}{W_1 - W_3} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_3} \tag{3.16}$$

وتعرف القيمة $(1-C)$ بمعامل التجنيب لملف التبريد B، وتقع هذه القيمة بين ٠,١ إلى ٠,٢ لملفات التبريد المستخدمة في صناعة التبريد.



شكل ٣,٣ عمليتي تسخين وتبريد محسوس.



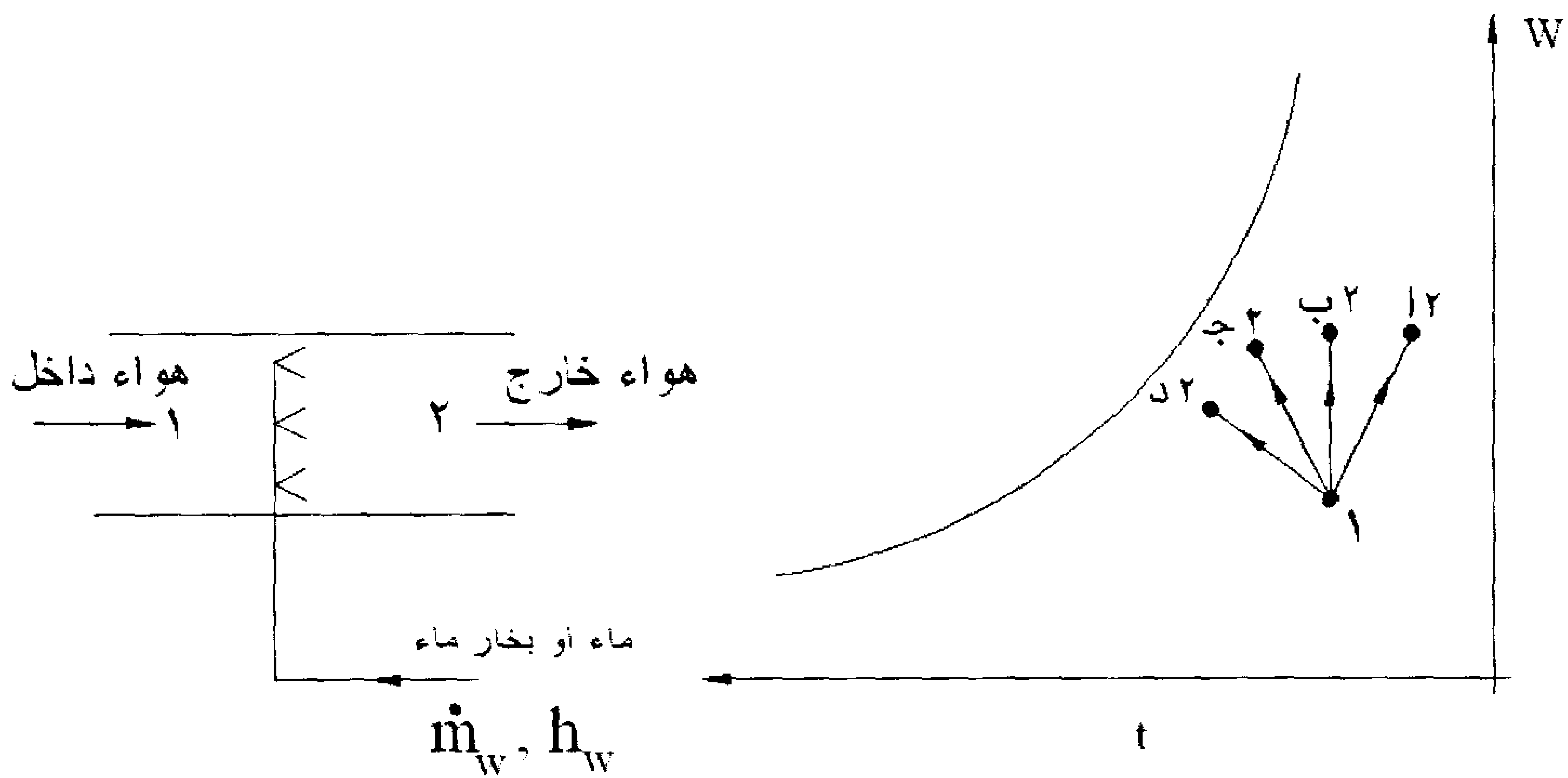
شكل ٣,٤ عملية تبريد ونزع رطوبة وتمثيلها على خريطة السيكرومتري.

فى العملية الرابعة ندرس ترطيب الهواء، أي زيادة رطوبته. ويمكن ترطيب الهواء بإضافة الماء أو بإضافة بخار الماء إليه (انظر شكل ٣,٥). ويعطي اتـزان كتلة الماء للعملية بالمعادلة الآتية:

$$\dot{m}W_2 = \dot{m}W_1 + \dot{m}_w$$

حيث $\dot{m}_w$ هي معدل كتلة الماء أو بخار الماء المضاف للهواء، و $\dot{m}$ هي معدل سريان كتلة الهواء، ويمكن كتابة المعادلة السابقة كالاتي:

$$\dot{m}_w = \dot{m}(W_2 - W_1) \qquad (3.17)$$



شكل ٣,٥ عملية ترطيب الهواء بماء أو ببخار ماء.

أيضا يعطي اتزان الطاقة للهواء أثناء عملية الترطيب المعادلة الآتية

$$\dot{m}h_2 = \dot{m}h_1 + \dot{m}_w h_w$$

بالتعويض باستخدام المعادلة (3.17) في المعادلة السابقة ينتج

$$h_w = \frac{h_2 - h_1}{W_2 - W_1} \qquad (3.18)$$

حيث h_w هي انثالبي الماء أو بخار الماء المضاف للهواء. أي إن نسبة تغير الانثالبي إلى تغير نسبة الرطوبة (أو ميل هذا الخط) بين نقطة دخول الهواء وخروجه يعتمد على قيمة h_w. فكلما زادت قيمة h_w كلما زاد ميل الخط، وهذا يستوجب ان تقع النقطة (٢) على يمين نقطة (١). ولذلك يمكن القول أن قيمة h_w

لها تأثير أساسي في تحديد نقطة (٢)، (انظر التدريج الخارجي للمنقلـــة الموجـــودة على يسار خريطة السيكرومتري).

وهناك حالة خاصة لترطيب الهواء، وهي استخدام ماء متـــوفر فـــي البيئـــة المحيطة لترطيب الهواء تسمى هذه العملية بالتكييف الصحراوي (desert cooling) أو التبريد التبخيري (evaporative cooling)، في هذه الحالة يتم ترطيـــب الهـــواء باستخدام ماء متوفر من البيئة المحيطة، وفي هذه الحالة تكون h_w هي انثالبي الماء عند درجة حرارة الماء، وفي الغالب يمكن اعتبار هذه العملية بأنها عمليـــة ثابتـــة درجة حرارة البصيلة المبتلة، أي إن درجة حرارة البصيلة المبتلة للهواء الـــداخل والخارج واحدة ($t_1^* = t_2^*$). ويوضح الشكل ٣,٦ هذه العملية، حيث يـــتم ترطيـــب الهواء من نقطة (١) إلى نقطة (٢) على خط ثابت درجة حرارة البصيلة المبتلـــة، وفي هذه الحالة فان اقصى نقطة يصل لها الهواء الخارج هي عند التقاء خط ثابت درجة حرارة البصيلة المبتلة مع خط التشبع (أي نقطة ٣) كما يظهر من الـــشكل. ويمكن أيضا تقريب عملية ترطيب الهواء في حالة إضافة بخار ماء مـــشبع علـــى أساس أنها عملية ثابتة درجة حرارة البصيلة الجافة، انظر شـــكل ٣,٦. ويمكـــن تعريف كفاءة الترطيب η_H في هاتين الحالتين كالاتي:

$$\eta_H = \frac{W_2 - W_1}{W_3 - W_1} \tag{3.19}$$

مثال ٣,١

تم خلط أدياباتيا هواء أحدهما عند حالة ١ لها درجة ٤٠ °م و ٦٠٪ رطوبة نسبية ومعدل سريان حجمي قدره ٢٠٠٠ لتر/ث مع هواء عند حالة ٢ لها درجة حرارة ٢٥ °م و ٥٠٪ رطوبة نسبية ومعدل سريان حجمي قدره ٤٠٠٠ لتر/ث. يمر ناتج الخلط عند حالة ٣ على ملف تبريد متوسط درجة حرارة سطحه ١٠ °م وله معامل تجنيب B قدره ٠,٢. يخرج الهواء من ملف

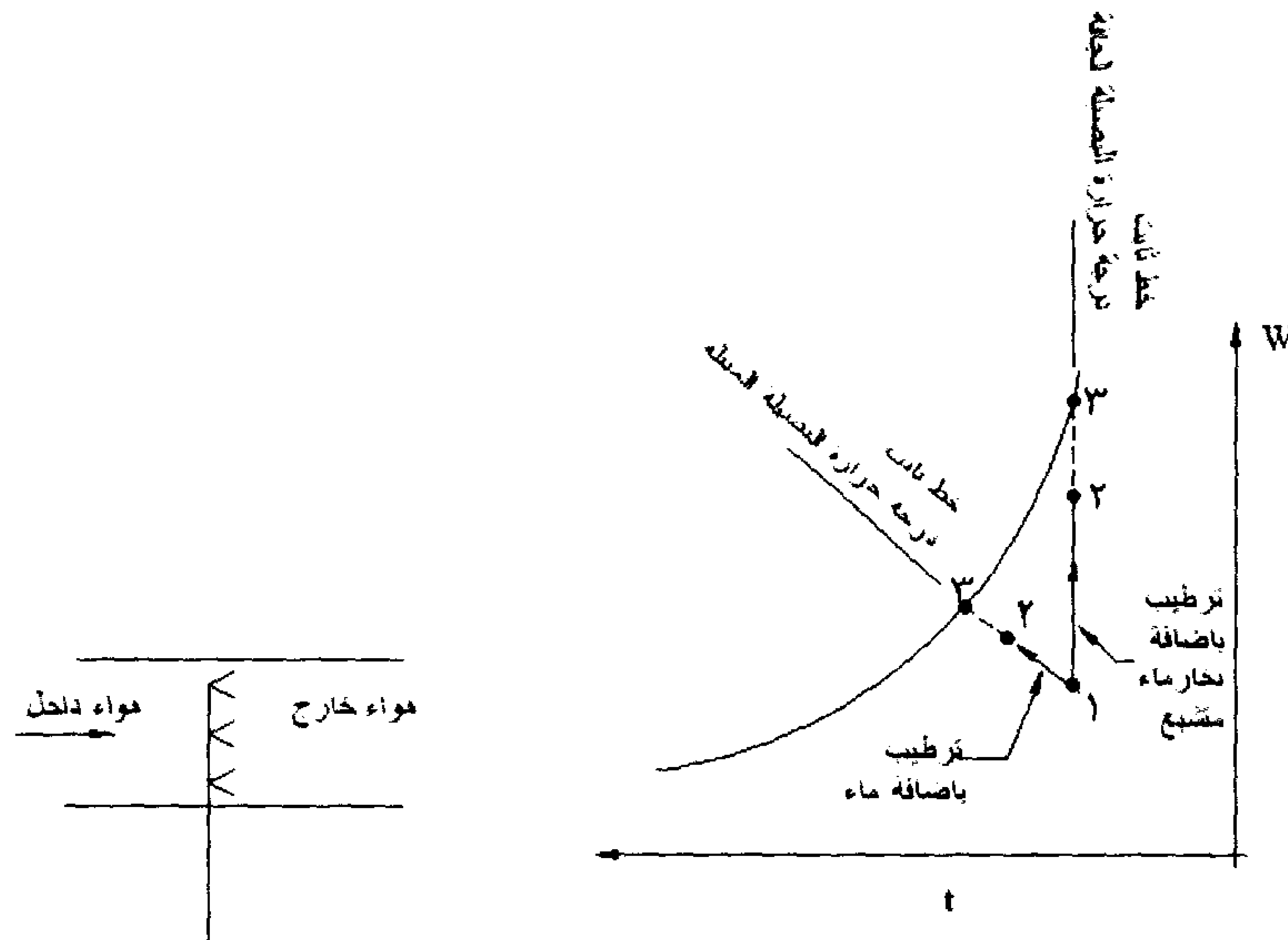
التبريد عند حالة ٤ (انظر الشكل ٣,٧). وقع حالات الهواء السابقة على خريطة السيكرومتري على افتراض ضغط جوي قدره واحد جوي، ثم أوجد الآتي:

أ) معدل كتلة سريان الهواء على الملف.

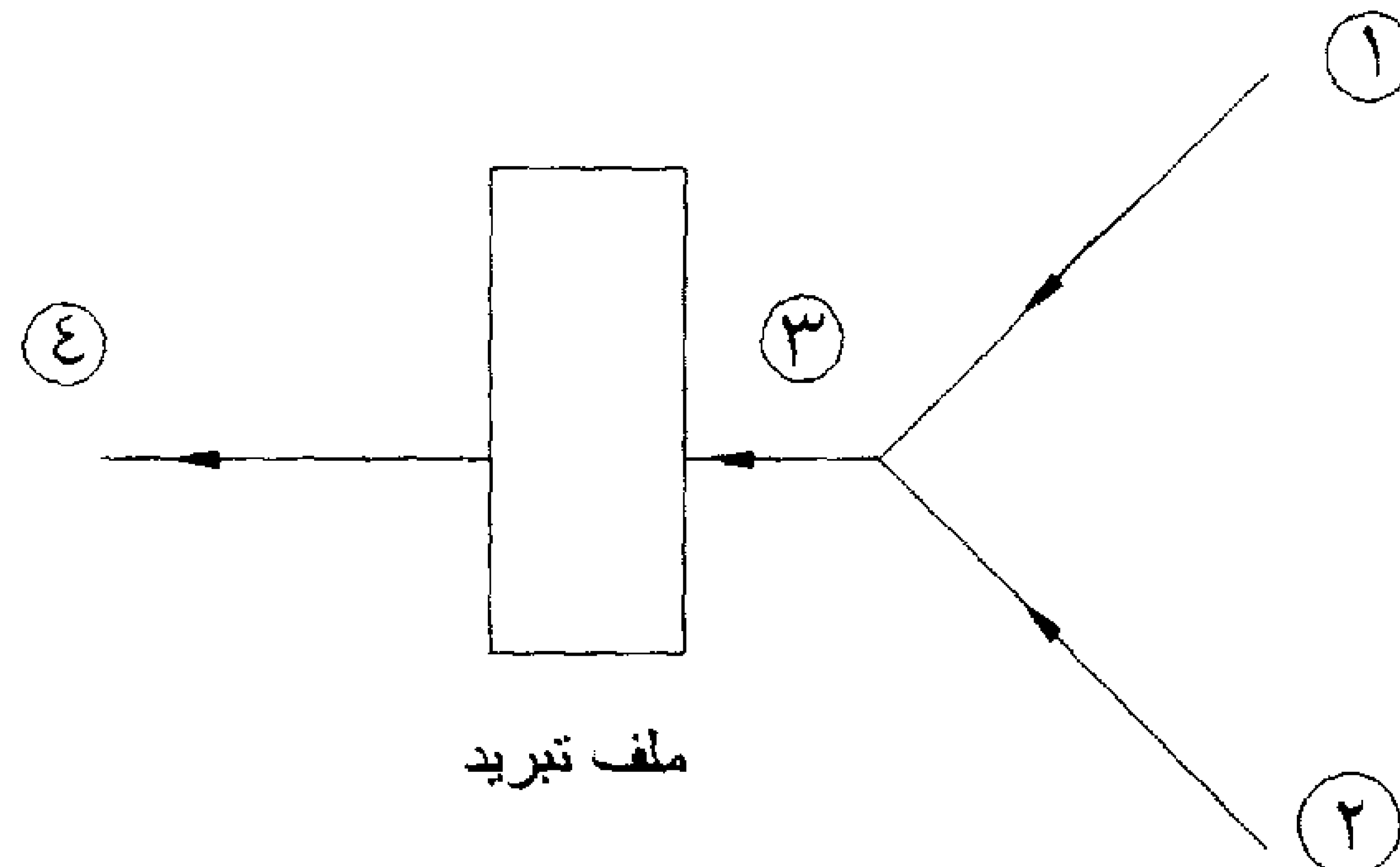
ب) درجة حرارة البصيلة الجافة للهواء عند الحالة ٣.

ج) درجة حرارة البصيلة الجافة والمبتلة للهواء الخارج من ملف التبريد.

د) كمية المياه المتكثفة من الهواء عند مروره على ملف التبريد وكمية الحرارة المنتزعة من ملف التبريد.



شكل ٣,٦ تمثيل عملية ترطيب الهواء بماء على خريطة السيكرومتري.



شكل ٣,٧ عملية خلط وتبريد ونزع رطوبة لمثال ٣,١.

الحل

باستخدام خريطة السيكرومتري عند ضغط واحد جوي (١٠١,٣٢٥ كيلوباسكال) يمكن توقيع الحالة ١ عند درجة حرارة ٤٠ °م و ٦٠٪ رطوبة نسبية، وكذلك بالنسبة للحالة ٢ عند درجة حرارة ٢٥°م و ٥٠ ٪ رطوبة نسبية. كما يمكن من الخريطة قراءة جميع خصائص هاتين الحالتين، مثل الانثالبي ونسبة الرطوبة وغيرهما. تم تلخيص بعض الخصائص في الجدول الآتي:

الحالة	درجة حرارة البصيلة الجافة (°م)	درجة حرارة البصيلة المبتلة (°م)	الرطوبة النسبية (٪)	الحجم النوعي م³/كيلوجرام	نسبة الرطوبة (جرام ماء/كيلوجرام هواء)
١	٤٠		٦٠	٠,٩٢٨	٢٨,٥
٢	٢٥		٥٠	٠,٨٥٨	٩,٨
٣	٢٩,٨	٢٣,٥			١٥,٧٢
٤	١٤	١٣,٣			٩,٣

يمكن حساب معدل سريان الكتلة عند الحالة ١ و ٢ باستخدام المعادلة

$$\dot{m} = \frac{\dot{V}}{v}$$

حيث $\dot{V}$ هو معدل سريان الهواء الحجمي، أي إن معدل سريان الكتلة يساوي معدل السريان الحجمي على الحجم النوعي. بتطبيق ذلك على الحالتين ١ و ٢ ينتج

$$\dot{m}_1 = \frac{2.0}{0.928} = 2.16\ \text{kg/s}$$

$$\dot{m}_2 = \frac{4.0}{0.858} = 4.66\ \text{kg/s}$$

و ينتج أن معدل سريان الهواء خلال ملف التبريد $\dot{m}_1 + \dot{m}_2$ ، أي إن

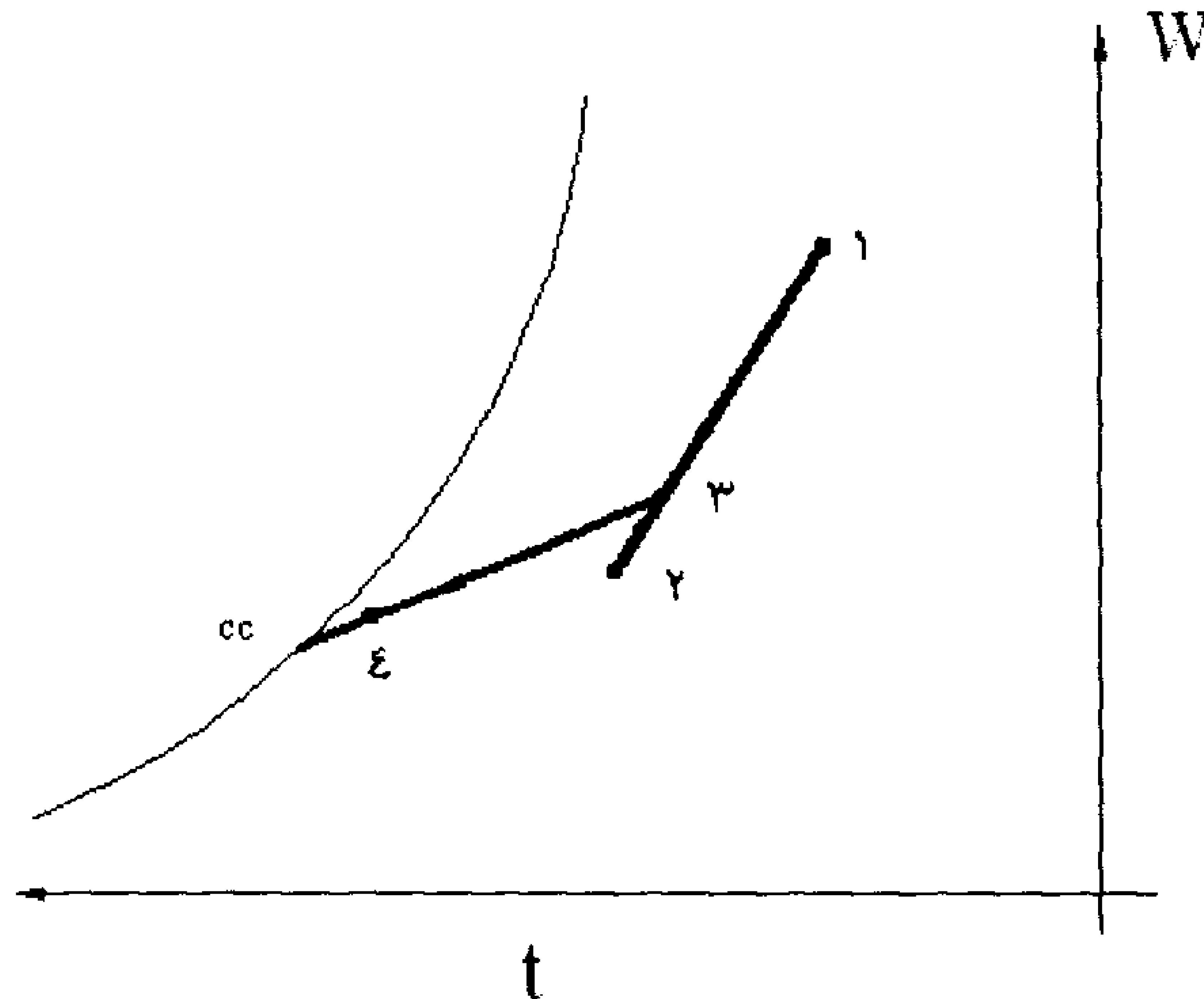
$$\dot{m} = 6.82\ \text{kg/s}$$

يمكن توقيع الحالة ٣ (ناتج الخلط) باستخدام العلاقات التي تم شرحها في بداية هذا الفصل والخاصة بالخلط وهي

$$W_3 = \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2} W_1 + \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2} W_2$$

ومنها ينتج أن نسبة الرطوبة عند الحالة (٣) تساوي ١٥,٧٢ جرام ماء لكل كجرام هواء. ويمكن توقيع الحالة ٣ بإيصال نقطتي ١ و ٢ ثم على تدريج نسبة الرطوبة وعند نسبة رطوبة W_3 (من المعادلة السابقة) يمكن رسم خط ليتقاطع مع الخط الواصل بين الحالة ١ والحالة ٢ ويتم إيقاع الحالة ٣. وعندها تكون درجة حرارة البصيلة الجافة t_3=29.8° C ودرجة حرارة نقطة الندى حوالي ٢٣,٥°م ، كما هو مبين على شكل ٣,٨ للخريطة.

يمر ناتج الخلط (أي الهواء عند الحالة ٣) على ملف التبريد، حيث درجة حرارة سطح الملف ١٠ °م ، ولأن هذه الدرجة هي أقل من درجة حرارة نقطة الندى للهواء الداخل على الملف (وهي ٢٩,٨°م) ، لذلك يتم تكثف جزء من الماء الموجود في الهواء عند مروره على الملف.



شكل ٣,٨ تمثيل العمليات في مثال ٣,١ على خريطة السيكرومتري.

ولتوقيع الحالة ٤ يتم ايصال خط بين النقطة ٣ ونقطة على خط التشبع عند درجة حرارة ١٠ °م. وحسب تعريف معامل التجنيب بالمعادلة

$$B = \frac{t_4 - t_{cc}}{t_3 - t_{cc}}$$

حيث t_{cc} هي درجة حرارة الملف =١٠ °م، والتذييل $_{cc}$ يعني ملف تبريد (cooling coil). من المعادلة السابقة ينتج أن درجة الحرارة عند الحالة ٤ تساوي ١٤ °م، ولذلك يمكن إيقاع الحالة ٤ على الخط الواصل بين الحالة ٣ ودرجة الحرارة ١٠ °م على خط التشبع وعند درجة حرارة بصيلة جافة تساوي ١٤ °م. يمكن قراءة الانثالبي عند نقطة ٣ ونقطة ٤ من خريطة السيكرومتري (h_3=70.5, h_4=37.5 kJ/kg).

يمكن حساب معدل تكثف الماء بسبب مروره على ملف التبريد باستخدام المعادلة

$$\dot{m}_w = \dot{m}(W_3 - W_4)$$

بالتعويض ينتج أن معدل ماء التكثف

$$\dot{m}_w = 6.82 * (15.72 - 9.3) * 10^{-3} = 0.044 \quad \text{kg/s}$$

يمكن حساب كمية الحرارة التي تم انتزاعها من الهواء عند مروره على الملف باستخدام

$$\dot{Q}_{cc} = \dot{m}(h_3 - h_4)$$

$$\dot{Q}_{cc} = 6.82 * (70.5 - 37.5) = 225 \quad \text{kW}$$

الرموز ومعانيها للفصل الثالث

B	معامل التجنيب لملف التبريد [−]
C	معامل التلامس لملف التبريد [−]
p	الضغط [كيلوباسكال]
p_a	الضغط الجزئي للهواء الجاف [كيلوباسكال]
p_v	الضغط الجزئي لبخار الماء [كيلوباسكال]
p_{ws}	ضغط التشبع لبخار الماء [كيلوباسكال]
t	درجة حرارة البصيلة الجافة [°م]
t^*	درجة حرارة البصيلة المبتلة [°م]
t_{dp}	درجة حرارة نقطة الندى [°م]
W	نسبة الرطوبة [جم ماء/كجم هواء]
W^*	نسبة الرطوبة للهواء المشبع عند درجة حرارة بصيلة مبتلة t^* [جم ماء/كجم هواء]
v	الحجم النوعي [م^3/كجم]

التذييل

cc	ملف التبريد
dp	درجة حرارة نقطة الندى
H	الرطوبة
s	التشبع
v	البخار

الحروف الإغريقية

φ الرطوبة النسبية [–]

η الكفاءة [–]

μ درجة التشبع [–]

ρ الكثافة [كجم/م^{٣}]

الفصل الرابع

مبادئ سريان الموائع
وانتقال الحرارة

٤,١ مقدمة

يضم الفصل الحالي عرضًا موجزًا لمبادئ سريان الموائع وانتقال الحرارة، حيث يلزم أن يلم مهندسي التصميم والتشغيل والصيانة لمخازن التبريد بهذه المبادئ، لضمان التصميم والتشغيل الأمثلين لهذه المخازن.

هناك كتب متخصصة لأكثر من مستوى في سريان الموائع وانتقال الحرارة، وليس المجال هنا لدراسة متعمقة ومكثفة في هذين الموضعين، ولكن يهدف هذا الفصل إلى مراجعة القوانين الأساسية فيهما. يبدأ الفصل الحالي بعرض سريع لقانوني بقاء الكتلة وبقاء الطاقة. يتبع هذا تقديما لحساب فقد ضغط السريان داخل الأنابيب. يقدم الفصل بعد ذلك مبادئ انتقال الحرارة بالصور المختلفة: التوصيل والحمل والإشعاع، بعد ذلك يعرض الفصل حساب المعامل الكلي لانتقال الحرارة ثم استخدام الزعانف لتحسين عملية انتقال الحرارة. وأخيرًا يقدم الفصل المبادئ الأولية لأداء وتصميم المبادلات الحرارية.

٤,٢ قانون بقاء الكتلة

يعتبر قانون بقاء الكتلة واحدًا من أهم القوانين الأساسية التي تحكم سريان الموائع. وينص هذا القانون في شكله العام على أن الكتلة لا تفنى ولا تستحدث، ما لم يكن هناك تفاعل نووي، حيث تحول الكتلة إلى طاقة، ويمكن التعبير رياضيا عن قانون بقاء الكتلة عند تطبيقه على نظام مفتوح (control volume) ما بالآتي:

$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_o + \frac{dM}{dt} \qquad (4.1)$$

ويمثل الطرف الأيسر مجموع معدل السريانات الداخلة إلى النظام، ويمثل الحد الأول بالطرف الأيمن مجموع معدل السريانات الخارجة من النظام، ويمثل الحد الثاني بالطرف الأيمن معدل تغير كتلة النظام مع الزمن، ويكون هذا الحد موجبًا إذا زادت كتلة النظام مع الزمن، وسالبًا إذا قلت هذه الكتلة مع الزمن. وتؤول المعادلة السابقة عند حالة الاستقرار إلى الآتي:

$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_o \qquad (4.2)$$

ويقدر معدل السريان لمائع ما خلال أي مساحة مقطع A عمودية على اتجاه سريان يمر بسرعة منتظمة V بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$\dot{m} = \rho V A \qquad (4.3)$$

حيث ρ هي كثافة المائع و V هي السرعة المتوسطة للسريان خلال مساحة المقطع. ويعرف معدل السريان الحجمي $\dot{V}$ بأنه حاصل ضرب السرعة في المساحة.

مثال ٤,١

مخزن تبريد عند درجة حرارة قدرها −٢٠°م ورطوبة نسبية قدرها ٩٠٪. عند فتح باب المخزن يتسرب الهواء الخارجي عند ١٠°م و ٥٠٪ رطوبة نسبية إلى داخل المخزن بمعدل قدره ٦,٠٠٠ لتر/ث. احسب معدل الهواء المتسرب من داخل المخزن إلى خارجه بفرض تساوي مساحة مدخل ومخرج الهواء.

الحل

بفرض حالة الاستقرار، تعطي المعادلة (4.2) الآتي:

$$\rho_o \dot{V}_o = \rho_i \dot{V}_i$$

حيث تمثل $\dot{V}$ معدل السريان الحجمي للهواء، ويمثل التذييل i و o الدخول والخروج من المخزن على التوالي. وبفرض ضغط جوى واحد خارج وداخل المخزن، فإن يمكن إيجاد كثافة الهواء باستخدام القانون المثالي للغازات كما يلي:

$$\rho_i = \frac{p_i}{R_a T_i} = \frac{101.325 \times 10^3}{287 \times (273 + 10)} = 1.25 \quad \text{kg/m}^3$$

$$\rho_o = \frac{p_o}{R_a T_o} = \frac{101.325 \times 10^3}{287 \times (273 - 20)} = 1.40 \, \text{kg/m}^3$$

وعلية يقدر معدل سريان الهواء الخارج من المخزن كما يلي:

$$\dot{V}_o = \frac{\rho_i}{\rho_o} \dot{V}_i = \frac{1.40}{1.25} 6000 = 6720 \quad \text{l/s}$$

لاحظ اختلاف معدل سريان حجم الهواء الداخل إلى المخزن عن الخارج منه نتيجة اختلاف الكثافة.

٤,٣ معادلة الطاقة لسريان الموائع

يحكم القانون الأول للديناميكا الحرارية اتزان الطاقة للسريانات المختلفة خلال نظام ما. وينص هذا القانون على أن الطاقة لا تفنى ولا تستحدث ما لم يكن هناك تفاعل نووي، وأن الطاقة تتغير من صورة إلى أخرى. وبتطبيق هذا القانون على نظام مفتوح عند حالة الاستقرار، فإنه يأخذ الشكل الآتي:

$$\dot{Q}-\dot{W}=\sum \dot{m}_o\left(\frac{1}{2}V_o^2+gz_o+\frac{p_o}{\rho_o}+u_o\right)-\sum \dot{m}_i\left(\frac{1}{2}V_i^2+gz_i+\frac{p_i}{\rho_i}+u_i\right) \quad (4.4)$$

حيث $\dot{Q}$ هي معدل انتقال الحرارة إلى النظام (وتكون سالبة في الاتجاه العكسي)، و $\dot{W}$ هي القدرة الميكانيكية التي يعطيها النظام (وتكون سالبة إذا أخذها النظام)، و V هي سرعة السريان، و z هي ارتفاع مستوى السريان عن المستوى المرجعي (موجب ضد الجاذبية الأرضية وسالب في اتجاه الجاذبية الأرضية)، و p هو ضغط السريان و u هي الطاقة الداخلية للسريان. ويمثل التذييلان i و o حالة الدخول والخروج إلى ومن النظام، على التوالي.

وهناك العديد من النظم التي تحوي سريانات ثابتة درجة الحرارة (أي $u_i = u_o$) وبدون تبادل حراري $(\dot{Q}=0)$ أو قدرة ميكانيكية $(\dot{W}=0)$ مع مصادر خارجية، فإذا فرضنا سريانا غير لزج (أي بإهمال الاحتكاك الداخلي)، تؤول المعادلة (4.4) إلى ما يعرف بمعادلة برنولي التي تنص على الآتي

$$\frac{1}{2}V_i^2+gz_i+\frac{p_i}{\rho_i}=\frac{1}{2}V_o^2+gz_o+\frac{p_o}{\rho_o} \quad (4.5)$$

وتمثل الحدود الثلاثة بالطرف الأيسر أو الأيمن، على الترتيب: طاقة الحركة، وطاقة الوضع، وطاقة السريان لوحدة الكتلة من السريان. عندئذ تنص معادلة برنولي للسريانات غير اللزجة على أن مجموع طاقة الحركة وطاقة الوضع وطاقة السريان يكون ثابتًا للسريان تحت الشروط التي قدمناها سابقًا (أي بدون تبادل حراري وقدرة مع مصادر خارجية).

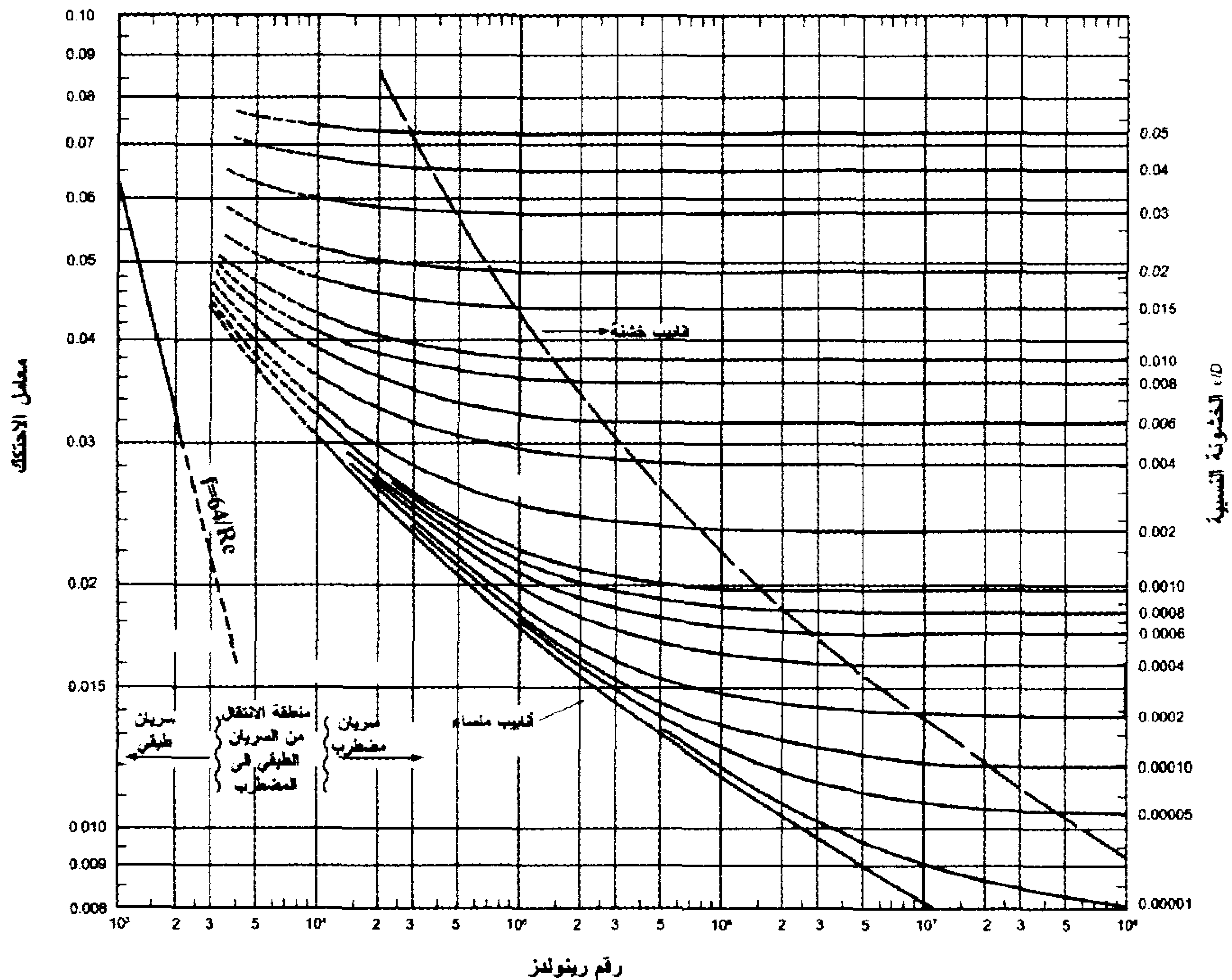
٤,٤ فقد الضغط للسريان داخل الأنابيب

يمثل السريان داخل الأنابيب قطاعًا كبيرًا من التطبيقات الهندسية المستخدمة في صناعة التبريد. وتضم معظم التطبيقات مضخات تعمل على دفع

السريان خلال شبكة الأنابيب والمواسير. وبفرض إمكانية إهمال انتقال الحرارة بين السريان داخل الأنابيب والجو الخارجي، فإن المعادلة (4.4) تؤول إلى الآتي:

$$\left|\dot{W}_P\right| = \dot{m}_o\left(\frac{1}{2}V_o^2 + gz_o + \frac{p_o}{\rho}\right) - \dot{m}_i\left(\frac{1}{2}V_i^2 + gz_i + \frac{p_i}{\rho}\right) + \sum \dot{m}\left(\frac{\Delta p'}{\rho} + \frac{\Delta p''}{\rho}\right) \quad (4.6)$$

حيث $\Delta p'$ تمثل فقد الضغط الرئيسي في الأنابيب، بينما تمثل $\Delta p''$ فقد الضغط الثانوي. ويعرف الضغط الرئيسي بأنه الضغط بسبب احتكاك سريان المائع بجدار الأنبوب، أما الضغط الثانوي فهو نتيجة المكونات الأخرى في الأنبوب مثل الأكواع، والمحابس وتغيير الضغط.



شكل ٤,١ خريطة مودي لحساب معامل الاحتكاك *f* [ASHRAE 2009].

ويعبر عن فقد الضغط الرئيسي بالمعادلة الآتية:

$$\frac{\Delta p'}{\rho} = f \frac{L}{d} \frac{\overline{V}^2}{2} \qquad (4.7)$$

حيث f هي معامل الاحتكاك داخل الأنبوب و L و d هما على الترتيب طول الأنبوب وقطره، و $\overline{V}$ هي السرعة المتوسطة للسريان داخل الأنبوب. ويقدر معامل الاحتكاك f من خريطة مودي (Moody diagram) (شكل ٤,١) بدلالة رقم رينولدز (Reylonds) والخشونة النسبية لسطح الأنبوب، اللتان تعرّفان على التوالي كما يلي:

$$\text{Re} = \rho \overline{V}\, d/\mu \qquad (4.8)$$

$$\varepsilon = e/d \qquad (4.9)$$

حيث μ هي اللزوجة الديناميكية للمائع داخل الأنبوب و e هي متوسط خشونة سطح الأنبوب. ويعطي جدول ٤,١ قيم e لمواد مختلفة.

جدول ٤,١ الخشونة المتوسطة لبعض المواد [Fox & McDonald 2006].

المادة	الخشونة (مم)
حديد زهر	٠,٢٦
صلب تجارى	٠,٠٤٦
خرسانة	٠,٣ –٣,٠
أنابيب مسحوبة	٠,٠٠١٥
نحاس أحمر أو أصفر	٠,٠٠١٥
صاج مجلفن	٠,١٥
زجاج أو بلاستيك	ملساء

ويقدر فقد الضغط الثانوي من المعادلة الآتية:

$$\frac{\Delta p''}{\rho} = \frac{1}{2} K \overline{V}^2 \qquad (4.10)$$

حيث K هي معامل فقد الضغط للجزء المتسبب في الفقد الثانوي، مثل المحابس والأكواع وغيرها. ويبين جدول ٤,٢ قيم K لبعض الأجزاء المستخدمة في نظم الأنابيب. ويلاحظ أن القيم المعطاة للمعامل K هي قيم تقريبية، حيث تتغير قيم K عادة مع قطر الأنبوب المستخدم معه المحبس أو الكوع.

مثال ٤,٢

يتكون خط من الأنابيب من أنبوب من الحديد الزهر بقطر ٥ سم وطول ٢٠ مترًا ومحبس كروي مفتوح وكوع ٩٠° قياسي. احسب فقد الضغط خلال هذا الخط لسريان من الماء بسرعة متوسطة قدرها ٣م/ث. افرض أن درجة حرارة الماء هي٥°م.

الحل

من جداول خواص الماء، نجد أن كثافة الماء عند ٥°م هي ١٠٠٠كجم/م^3 وأن لزوجته الديناميكية هي ١,٥١٩× ١٠$^{-3}$ باسكال. ثانية. من معادلة ٤,٨ يقدر رقم رينولدز كما يلي:

$$\text{Re} = \frac{\rho \overline{V} d}{\mu} = \frac{1000 \times 3 \times 0.05}{1.519 \times 10^{-3}} = 9.9 \times 10^4$$

من جدول ٤,١ نجد أن خشونة سطح الأنبوب هي ٠,٠٠٠٢٦ متر أي إن:

$$\varepsilon = \frac{e}{d} = \frac{0.00026}{0.05} = 0.0052$$

من خريطة مودي بشكل ٤,١ نجد أن قيمة معامل الاحتكاك f هي ٠,٠٣١ ومن جدول ٤,٢ نجد أن قيمة معامل فقد الضغط K لمحبس كروي مفتوح هي

١٠، ولكوع ٩٠° قياسي هي ١,٥ ومن معادلة ٤,٧ ومعادلة ٤,١٠ يحسب فقد الضغط خلال خط الأنابيب كما يلي:

$$\Delta p = f\frac{L}{d}\frac{\rho\overline{V}^2}{2} + \frac{1}{2}\rho\overline{V}^2(K_1 + K_2)$$

$$\Delta p = \left(0.031 \times \frac{20}{0.05} + 10 + 1.5\right) \times 0.5 \times 1000 \times (3^2) = 107550.\ \text{Pa}$$

جدول ٤,٢ قيم معامل فقد الضغط *K* لبعض الأجزاء المستخدمة في نظم الأنابيب [Munson *et al.* 1998].

البند	معامل فقد الضغط
كوع ٤٥° (قياسي)	٠,٤٠
كوع ٩٠° (قياسي)	١,٥
كوع ٩٠° (نصف قطر طويل)	٠,٧٠
ازدواج	٠,٠٨
وصلة توصيل أنبوبين	٠,٠٨
محبس بوابي (مفتوح)	٠,١٥
¾ مفتوح	٠,٢٦
½ مفتوح	٢,١
¼ مفتوح	١٧,٠
محبس كروي مفتوح	١٠,٠
تحويلة ١٨٠°	١,٥
تى – خط السريان الرئيسي	٠,٩٠
تى – خط التفريع	٢,٠

٤,٥ انتقال الحرارة بالتوصيل

تنتقل الحرارة من سطح ما بواحدة أو أكثر من الطرق الآتية: التوصيل، والحمل، والإشعاع. تنتقل الحرارة بالتوصيل خلال جزيئات مادة صلبة ما، دون انتقال الجزئيات من مكانها. ويعطى معدل انتقال الحرارة $\dot{Q}$ في مكان ما لأحد المواد، عند حالة الاستقرار، باستخدام معادلة فوريير(Fourier) التي تنص على ما يلي:

$$\dot{Q} = -kA\frac{dT}{dx} \tag{4.11}$$

حيث k هي الموصلية الحرارية و A مساحة المقطع العمودي على اتجاه سريان الحرارة، و dT/dx هي معدل تغير درجة الحرارة في الاتجاه x الذي تسري فيه الحرارة.

وباستخدام العلاقة السابقة، يمكن استنباط المعادلات الخاصة بانتقال الحرارة في بعض التطبيقات الهندسية المهمة. فمثلا إذا كان هناك حائطاً سمكه δ وكانت درجتي حرارة سطحيه هما T_1 و T_2، فإن معدل انتقال الحرارة خلال السطح عند حالة الاستقرار يعطى بالمعادلة الآتية:

$$\dot{Q} = kA\frac{T_1 - T_2}{\delta} \tag{4.12}$$

حيث فُرض أن T_1 أكبر من T_2، وحيث A هي مساحة الحائط و k هي الموصلية الحرارية لمادة الحائط.

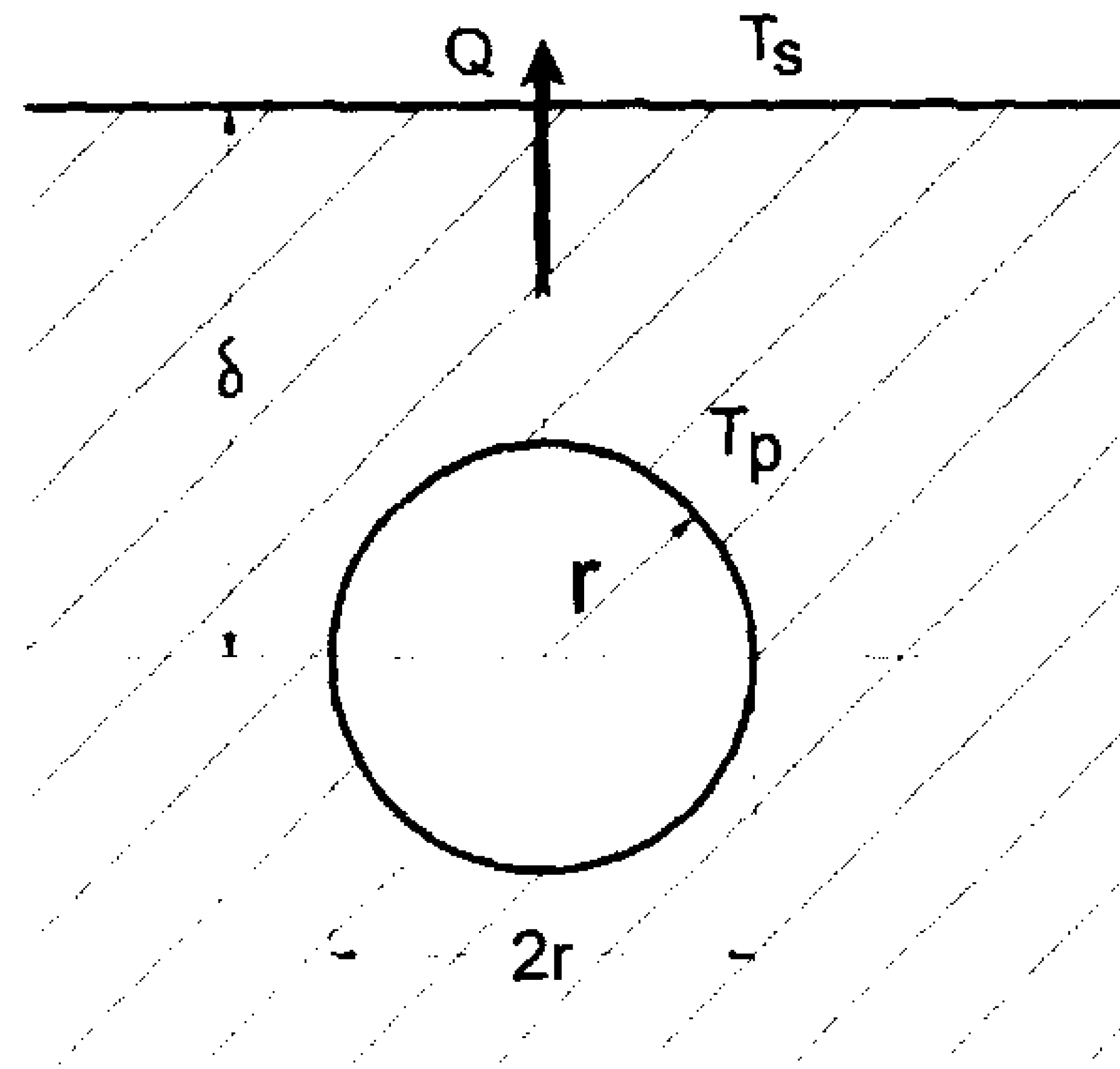
كما يمكن انتقال الحرارة بالتوصيل في شكل أسطواني، بفرض أنبوب قطره الداخلي d_i وقطره الخارجي d_o وله درجة حرارة سطح داخلي قدرها T_i ودرجة حرارة سطح خارجي قدرها T_o وكانت T_i أكبر من T_o، فإن معدل انتقال الحرارة من السطح الداخلي إلى السطح الخارجي في حالة الاستقرار تعطى كما يلي:

$$\dot{Q} = 2\pi kL\frac{T_i - T_o}{\ln(d_o/d_i)} \tag{4.13}$$

حيث L هي طول الأنبوب.

ومن التطبيقات الأخرى المهمة لانتقال الحرارة بالتوصيل، انتقال الحرارة من سطح أنبوب داخل حائط، كما هو موضح بشكل ٤,٢. فإذا كانت درجة

حرارة سطح الأنبوب هي T_p وكانت درجة حرارة السطح الخارجي للحائط هي T_s وكان الأنبوب على مسافة δ من سطح الحائط، عندئذ يقدر معدل انتقال الحرارة من الأنبوب إلى سطح الحائط، بفرض أن T_p أكبر من T_s كما يلي [ASHRAE 2001,1986].



شكل٤,٢ انتقال الحرارة بالتوصيل من سطح أنبوب مدفون داخل حائط على عمق δ من سطح الحائط.

$$\dot{Q} = 2\pi kL \frac{(T_p - T_s)}{\ln[(\delta + \sqrt{\delta^2 - r^2})/r]} \qquad (4.14)$$

حيث r هي نصف قطر الأنبوب و L هي طوله. ويلاحظ أن المعادلة السابقة صحيحة فقط عندما تكون δ أكبر من r وتكون L أكبر بكثير من قطر الأنبوب.

مثال ٤,٣

أنبوب بقطر ١٥سم يحمل ماء ساخن عند درجة ٤٠°م، مدفونة في بلاطة من الأسمنت المسلح عند عمق قدره ٣٠سم من سطح البلاطة. بفرض أن سطح الأسمنت محفوظ عند درجة حرارة قدرها ١٥°م، وأن الموصلية الحرارية

للأسمنت المسلح هي ١,٥وات/م.°م. احسب معدل الحرارة المنتقلة من الماء إلى سطح البلاطة، لكل وحدة طول من الأنبوب.

الحل

بفرض أن سطح الأنبوب عند ٤٠°م ، باستخدام معادلة ٤,١٤ ينتج أن:

$$\frac{\dot{Q}}{L} = 2\pi k \frac{T_p - T_s}{\ln[(\delta + \sqrt{\delta^2 - r^2})/r]}$$

$$\frac{\dot{Q}}{L} = \frac{2\pi \text{ x } 1.5 \text{ x } (40 - 15)}{\ln[(0.3 + \sqrt{0.3^2 - 0.075^2})/0.75]}$$
$$= 114 \text{ W/m}$$

٤,٦ انتقال الحرارة بالحمل

يلزم لانتقال الحرارة بالحمل وجود مائع يتحرك بالقرب من جسم أو سطح. وتنتقل الحرارة من السطح إلى المائع أو بالعكس خلال جزيئات المائع التي تتحرك وتحمل معها الحرارة من مكان إلى آخر. نلاحظ هنا أنه إذا لم تتمكن هذه الجزيئات من الحركة كان انتقال الحرارة بالتوصيل وليس بالحمل.

ينقسم انتقال الحرارة بالحمل إلى قسمين: انتقال الحرارة بالحمل الطبيعي (أو ما يعرف أيضا بالحمل الحر)، وانتقال الحرارة بالحمل القسري. في حالة انتقال الحرارة بالحمل الطبيعي تتحرك جزيئات المائع نتيجة تغير كثافتها بسبب انتقال الحرارة إليها أو منها. أما في حالة الحمل القسري، فإن جزيئات المائع تتحرك بفعل عامل خارجي، كمروحة أو مضخة مثلا، وليس كنتيجة تغير كثافة المائع. يقدر معدل انتقال الحرارة من سطح ما إلى مائع بجواره، بالمعادلة الآتية:

$$\dot{Q} = hA\Delta T \qquad (4.15)$$

حيث h هي معامل انتقال الحرارة بين السطح والمائع، و A هي المساحة العمودية على اتجاه انتقال الحرارة (مساحة المسطح)، و ΔT هي فرق درجات الحرارة بين السطح والمائع. ويعتمد حساب قيمة المعامل h على:

أ) نوع الحمل أن كان حملا طبيعيًا أم حملا قسريًا.

ب) نوع السريان إن كان سريانًا طبقيًا أم سريانًا مضطربًا.

ج) الشكل الهندسي للسطح.

د) الخواص الحرارية للسريان.

ففي حالة انتقال الحرارة بالحمل الطبيعي تقدر عادة قيمة h من العلاقة الآتية

$$\mathrm{Nu} = \mathrm{f}(\mathrm{Gr}, \mathrm{Pr}) \tag{4.16}$$

حيث Nu هو رقم نوسلت (Nusselt)، و Gr هو رقم جراشوف (Grashof)، و Pr هو رقم برانتل (Prandtl) وهذه الأرقام غير بعدية وتعرف على التوالي كما يلي:

$$\mathrm{Nu} = hL/k \tag{4.17}$$

$$\mathrm{Gr} = g\beta\Delta T\, L^3/\nu^2 \tag{4.18}$$

$$\mathrm{Pr} = \mu c_p/k \tag{4.19}$$

حيث k هي الموصلية الحرارية للمائع الحامل للحرارة، و β هي معامل التمدد الحراري للمائع، و c_p هي الحرارة النوعية للمائع عند ثبات الضغط، و ν و μ هي على التوالي اللزوجة الكيناماتيكية واللزوجة الديناميكية، و g هي عجلة الجاذبية الأرضية. وتعرف L بأنها الطول المميز لعملية انتقال الحرارة، وتعتمد قيمة L على الشكل الهندسي لسطح انتقال الحرارة. أيضا، يعتمد شكل الدالة f في معادلة (4.16) على نوع السريان. ومن الأشكال الهندسية المستخدمة في

العديد من التطبيقات الهندسية، انتقال الحرارة بين الأسطح المستوية وأسطح الأنابيب، ولهذه الأسطح تؤول المعادلة (4.16) إلى الآتي إذ كان السريان طبقيا [ASHRAE 1997].

$$Nu = 0.56(Gr\,Pr)^{0.25}\ ,\quad 10^4 \le GrPr < 10^8 \qquad (4.20)$$

أو إلى المعادلة الآتية إذا كان السريان مضطربًا

$$Nu = 0.13(Gr\,Pr)^{0.33}\ ,\quad 10^8 \le Gr\,Pr < 10^{12} \qquad (4.21)$$

ويبين جدول ٤,٣ الطول المميز لبعض الأشكال الهندسية التي تستخدم مع المعادلتين السابقتين.

جدول ٤,٣ الطول المميز لانتقال الحرارة بالحمل الطبيعي من بعض الأسطح.

الشكل الهندسي للسطح	الطول المميز
سطح مستوى رأسي	الارتفاع
السطح الخارجي لأنبوب رأسي	الطول
سطح مستوى أفقي (السطح الساخن متجه لأعلى والسطح البارد متجه لأسفل)	الطول
السطح الخارجي لأنبوب أفقي	القطر

يقدر معامل انتقال الحرارة بالحمل القسري عادة من معادلة تأخذ الشكل الآتي:

$$Nu = f(Re\,, Pr) \qquad (4.22)$$

حيث Re هو رقم رينولدز الذي يعرف لطول مميز L كما يلي

$$Re = VL/\nu \qquad (4.23)$$

حيث V هي السرعة، و L هو الطول المميز لانتقال الحرارة. ولقد أورد ماك آدمز [McAdams 1954] العلاقة الآتية لحساب معامل انتقال الحرارة لسريان مضطرب داخل أنبوب قطره d (حيث يجب أن يكون قيمة رقم رينولدز أكبر من ٢١٠٠).

$$\frac{hd}{k} = 0.023\left(\frac{Vd}{\nu}\right)^{0.8}\left(\frac{\mu C_p}{k}\right)^{0.4} \qquad (4.24)$$

حيث تقدر خواص المائع عند درجة حرارته. ومن التطبيقات الهندسية المهمة انتقال الحرارة بالحمل القسري بين أسطح مستوية في الهواء، ولقد أورد ماك آدمز (١٩٥٤) [McAdams 1954] العلاقات المعملية الآتية لحساب h عند هذه الحالة:

$$\left.\begin{aligned} h &= 7.2V^{0.78} \;, && 5 \le V \le 30\,\text{m/s} \\ &= 5.62 + 3.9V \;, && V \le 5\ \text{m/s} \end{aligned}\right\} \qquad (4.25)$$

حيث V هي سرعة الهواء (م/ث) و h بوحدات (وات/م^{٢}.^{o}م).

مثال ٤,٤

غرفة ارتفاعها الداخلي ٣ متر ومكيفة الهواء عند ٢٤°م. احسب معامل انتقال الحرارة بالحمل بين هواء الغرفة والحائط الجنوبي بها إذا كانت درجة حرارة سطح الحائط هي ٣٠°م. احسب أيضا الحمل الحراري المنتقل إلى الغرفة من الحائط إذا كان عرض الحائط ٤ أمتار.

الحل

تحسب خواص الهواء عند درجة الحرارة المتوسطة، أي عند ٢٧°م من ملحق ج كما يلي:

$k = 0.0262 \quad \mathrm{W/m\ K}$ $\qquad \nu = 1.57 \times 10^{-5} \quad \mathrm{m^2/s}$

$\beta = 0.18 \times 10^{-3} \quad \mathrm{1/K}$ $\qquad \mathrm{Pr} = 0.708$

من جدول ٤,٣ نجد أن الطول المميز للحائط هو ارتفاع الحائط، أي ٣ أمتار. من معادلة (4.18) يحسب قيمة Gr كما يلي:

$$\mathrm{Gr} = \frac{g\beta\Delta T L^3}{\nu^2} = \frac{9.81 \times 0.18 \times 10^{-3} \times (30-24) \times 27}{(1.57 \times 10^{-5})^2}$$

$$= 1.17 \times 10^9$$

$$\mathrm{Gr\,Pr} = 1.17 \times 10^9 \times 0.708 = 8.28 \times 10^8$$

$$\mathrm{Nu} = 0.13\ (8.28 \times 10^8)^{0.33} = 114$$

$$h = \frac{0.026 \times 114}{3} = 1\ \mathrm{W/m^2\,{}^\circ C}$$

ويكون الحمل الحراري من الحائط كما يلي:

$$\dot{Q} = hA\Delta T = 1 \times 3 \times 4 \times (30-24) = 72\ \mathrm{W}$$

٤,٧ انتقال الحرارة بالإشعاع

لا يحتاج انتقال الحرارة بالإشعاع إلى وسط مادي لنقل الحرارة، كما هو الحال في انتقال الحرارة بالتوصيل وبالحمل. تنتقل الحرارة بالإشعاع بين الأسطح المختلفة كموجات كهرومغناطيسية. وتقدر الحرارة المنتقلة بالإشعاع من سطح ما بطرق ومعادلات رياضية أكثر تعقيدا من المعادلات المستخدمة لحساب الحرارة المنتقاة بالتوصيل والحمل. ويعزى هذا إلى أن المعدل الإجمالي للحرارة المنتقلة من سطح بالإشعاع يعتمد على الشكل الهندسي لهذا السطح والشكل الهندسي لجميع الأسطح الأخرى الموجودة حول هذا الشكل وكذلك وضعها النسبي بالنسبة للسطح تحت الدراسة. فمن المعروف أن أي سطح يبث حرارة بالإشعاع، ويقدر معدل هذه الحرارة بالمعادلة الأساسية الآتية:

$$Q = \varepsilon\ \sigma\ A T^{4} \tag{4.26}$$

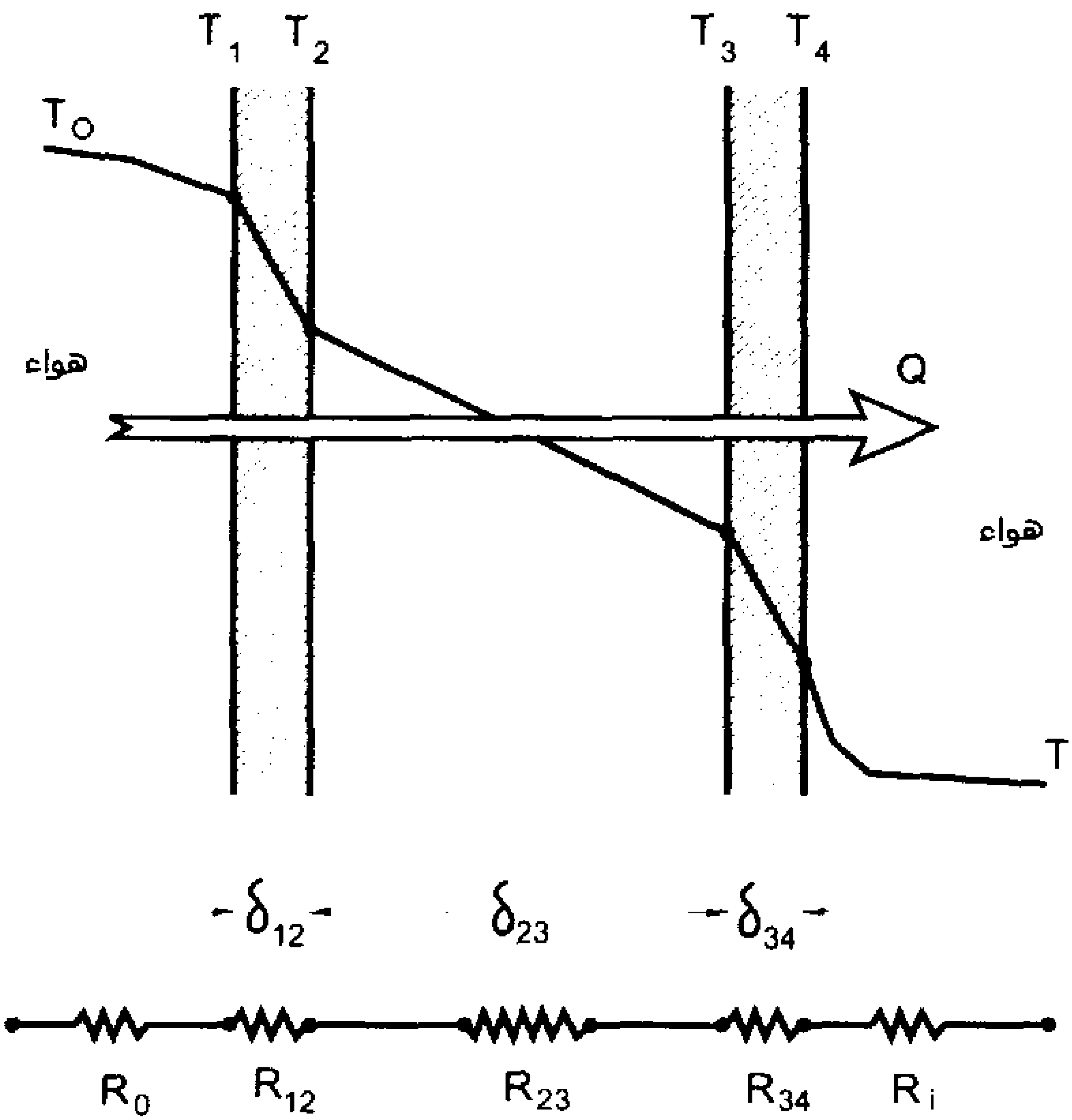
حيث A مساحة السطح، و T درجة حرارته (درجة مطلقة)، و ε هي الانبعاثية المتوسطة للسطح، و σ هي ثابت ستيفان وبولتزمان (Stefan-Boltzmann) = ٥,٦٧×١٠^-٨ وات/م٢.درجة مطلقة٤). فإذا أشير إلى هذا السطح بالرقم ١، وكان هناك سطحًا آخر أشير إليه بالرقم ٢ فإن معدل الحرارة المنتقلة من السطح ٢ إلى السطح ١ يقدر بالعلاقة التالية

$$\dot{Q}_{21} = \varepsilon_2 \sigma A_2 F_{21} T_2^4 \tag{4.27}$$

حيث F_{21} معامل الشكل الهندسي للسطح ٢ بالنسبة للسطح ١. ويمثل المعامل F_{21} نسبة الإشعاع المنبعث من السطح ٢ وتم وصوله إلى السطح ١، إلى إجمالي الإشعاع المنبعث من السطح ٢. وتعتمد قيمة المعامل F_{21} على الشكل الهندسي للسطحين ١و٢ وموقع كل منهما بالنسبة للآخر، وتعطى مراجع انتقال الحرارة قيم F_{21} للعديد من الأشكال الهندسية للأسطح (انظر:ASHRAE , 1997، Kreith, & Bohn, 1993، Incropera & Dewitt, 2002، Ozisik, 1989، Cengel, 1998، وغيرهم).

٤,٨ المعامل الكلي لانتقال الحرارة

بينا فيما سبق انتقال الحرارة بالتوصيل وبالحمل وبالإشعاع في نظم هندسية بسيطة، تختلف في معظم الأحيان عن التطبيقات الهندسية العملية. دعنا الآن ندرس انتقال الحرارة في حائط مكون من ثلاث طبقات من مواد مختلفة ومعرض لهواء عند درجات حرارة مختلفة من جهتي الحائط، كما هو مبين بشكل ٤,٣. في هذا الشكل، تسرى الحرارة من الهواء عند T_o إلى السطح T_1 بالحمل، ثم تسرى بالتوصيل بين الحوائط الثلاث حتى نصل إلى السطح الداخلي عند T_4، فتنتقل الحرارة مرة أخرى بالحمل إلى الهواء عند درجة الحرارة T_i. ويمكن عندئذ حساب معدل الحرارة المنتقلة خلال الحائط بالعلاقة التالية:



شكل ٤,٣ انتقال الحرارة بالحمل والتوصيل في حائط.

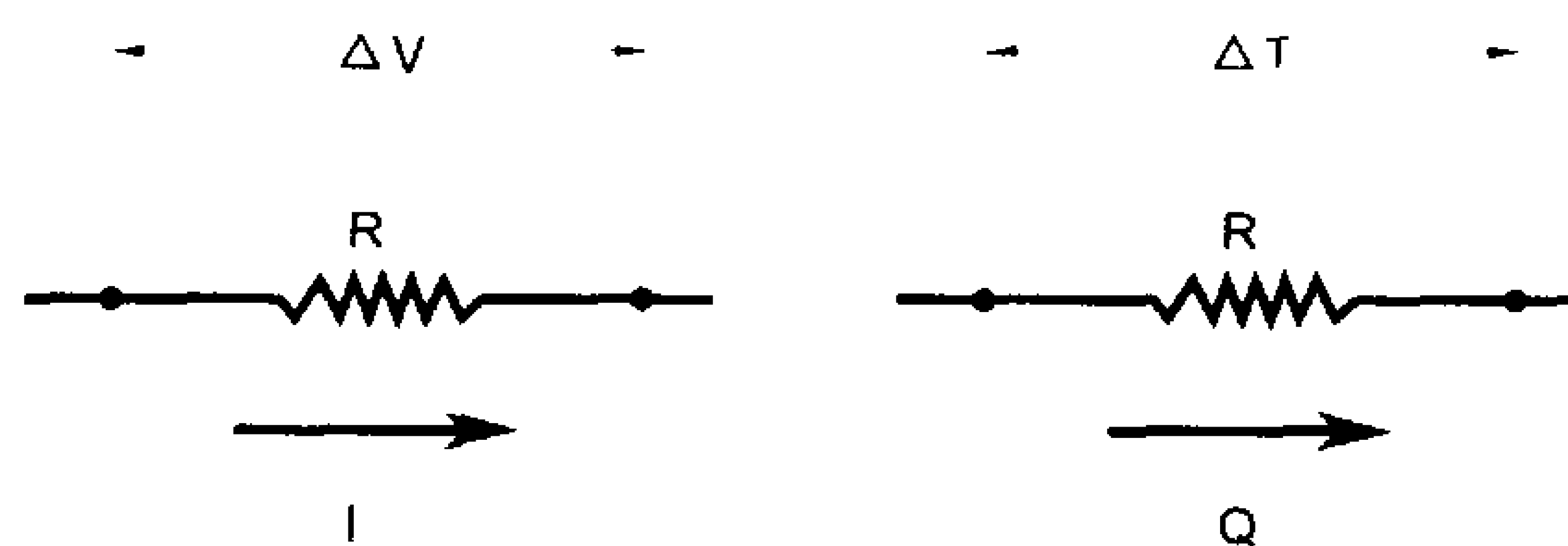
$$Q = UA \quad (T_o - T_i) \tag{4.28}$$

حيث U هي المعامل الكلي لانتقال الحرارة بين الهواء عند درجتي الحرارة T_o و T_i من جهتي الحائط، ولحساب قيمة U تتبع عادة طريقة التماثل بين سريان الحرارة وسريان التيار الكهربائي في الدوائر الكهربائية. فمن المعروف في الدوائر الكهربائية التعبير عن التيار الكهربائي بالعلاقة التالية (انظر شكل ٤,٤)

$$I = \Delta V / R \tag{4.29}$$

عندئذ يمكن التعبير عن سريان الحرارة بالعلاقة التالية:

$$Q = \Delta T / R$$



شكل ٤,٤ التماثل بين الدوائر الكهربائية والحرارية.

في العلاقتين السابقتين يناظر سريان الحرارة سريان التيار الكهربائي، ويناظر فرق الجهد فرق درجات الحرارة، بينما تناظر المقاومة الحرارية المقاومة الكهربائية (انظر شكل ٤,٤). من هذا المنطلق يمكن كتابة المعادلة السابقة في الصورة التالية:

$$\dot{Q} = \frac{T_o - T_i}{R_{eq}} = \frac{(T_o - T_i)}{1/UA} \qquad (4.30)$$

حيث R_{eq} هي المقاومة الحرارية المكافئة للنظام الموضح بشكل ٤,٤. وبالرجوع إلى المعادلات الأساسية لحساب سريان الحرارة بالتوصيل وبالحمل، ونظرًا لأن المقاومة الحرارية على التوالي، عندئذ تحسب قيمة U من العلاقة التالية:

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{h_o A} + \frac{\delta_{12}}{k_{12} A} + \frac{\delta_{23}}{k_{23} A} + \frac{\delta_{34}}{k_{34} A} + \frac{1}{h_i A}$$

أي إن

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_o} + \frac{\delta_{12}}{k_{12}} + \frac{\delta_{23}}{k_{23}} + \frac{\delta_{34}}{k_{34}} + \frac{1}{h_i} \qquad (4.31)$$

ويمكن استخدام فكرة التماثل بين الدوائر الكهربائية والحرارية لحساب قيمة U في العديد من النظم الهندسية الأخرى غير تلك الموضحة بشكل ٤,٣.

٤,٩ الزعانف

تستخدم الزعانف أو الأسطح الممتدة لتحسين معدل انتقال الحرارة بين سطح ما ومائع. ولمعرفة كيف يتم ذلك دعنا ندرس انتقال الحرارة من سطح أنبوب إلى هواء يسرى خارجها. يقدر معدل الحرارة المنتقلة في هذه الحالة كما يلي:

$$\dot{Q} = hA\,\Delta T \qquad (4.32)$$

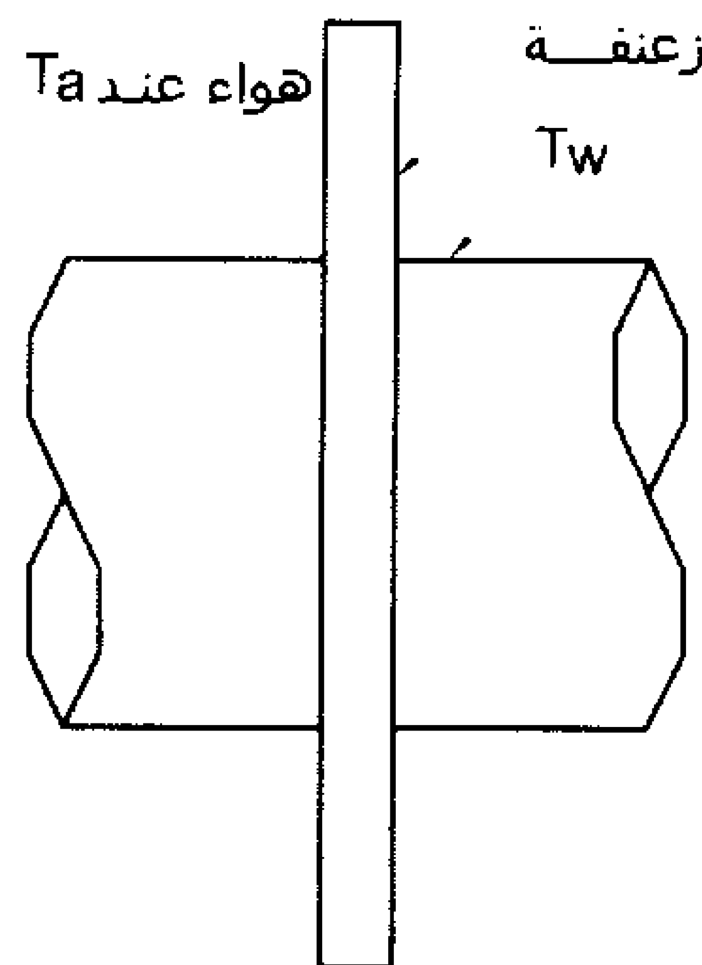
حيث h هي معامل انتقال الحرارة بالحمل بين السطح الخارجي للأنبوب والهواء، و A هي المساحة الخارجية للأنبوب، و ΔT هي فرق درجات الحرارة بين سطح الأنبوب والهواء. لزيادة معدل الحرارة المنتقلة دعنا نضع زعانف على السطح الخارجي للأنبوب (انظر شكل ٤,٥). يقدر معدل الحرارة المنتقلة من سطح الزعنفة عندئذ كما يلي:

$$\dot{Q}_f = h \int_{o}^{A_f} (T - T_a)\ dA_f \tag{4.33}$$

حيث T هي درجة حرارة سطح الزعنفة، و T_a هي درجة حرارة الهواء، و A_f مساحة سطح الزعانف. ونلاحظ هنا تغير درجة حرارة سطح الزعنفة مع الموقع على السطح. وتكتب المعادلة السابقة عادة في الشكل التالي:

$$\dot{Q}_f = \eta_f h A_f (T_w - T_a) \tag{4.34}$$

حيث η_f هي كفاءة الزعنفة، T_W هي درجة حرارة قاعدة الزعنفة عند الحائط. وتعطي كتب انتقال الحرارة قيم η_f لأشكال مختلفة من الزعانف (على سبيل المثال لا الحصر انظر: ASHRAE , 2009 ، Kreith, & Bohn, 1993، Incropera & Dewitt, 2002، Ozisik, 1989، Cengel, 1998 وغيرهم).



شكل ٤,٥ استخدام الزعانف على أنبوب لتحسين انتقال الحرارة بين سطح الأنبوب والهواء المحيط.

في المثال السابق، تنتقل الحرارة من سطح الأنبوب بالإضافة إلى انتقالها من سطح الزعانف. ويمكن إيجاد معدل الحرارة المنتقلة من السطح بجمع الحرارة المنتقلة من سطح الأنبوب Q_p والحرارة المنتقلة من الزعانف Q_f كما يلي:

$$\begin{aligned}\dot{Q} &= \dot{Q}_p + \dot{Q}_f \\ &= hA_p(T_w - T_a) + \eta_f A_f (T_w - T_a)\end{aligned} \tag{4.35}$$

حيث A_p هي مساحة سطح الأنبوب التي لا توجد عليها زعانف، و A_f هي مساحة سطح الزعانف. وتؤول المعادلة السابقة إلى:

$$\dot{Q} = \eta_s A(T_w - T_a) \tag{4.36}$$

حيث A هي المساحة الإجمالية للأنبوب والزعانف وتساوي $(A_p + A_f)$، و η_s هي كفاءة السطح التي تقدر كما يلي:

$$\eta_s = 1 - \frac{A_f}{A}(1 - \eta_f) \tag{4.37}$$

ويمكن إيجاد كفاءة السطح إذا كانت كفاءة الزعنفة ونسبة مساحة الزعانف إلى مساحة السطح الكلية معلومة. وتوجد في كتب انتقال الحرارة معادلات وأشكال لإيجاد كفاءة الزعنفة حسب نوعها [انظر: ASHRAE , 2009، Kreith, & Bohn, 1993، Incropera & Dewitt, 2002، Ozisik, 1989، Cengel, 1998].

وتستخدم الزعانف بكثرة في المبادلات الحرارية لتحسين معدل انتقال الحرارة بين السوائل والغازات، حيث توضع الزعانف من جهة الغاز نظرًا لأن معامل انتقال الحرارة للغاز أقل كثيرًا من مثيله من جهة السوائل.

٤,١٠ المبادلات الحرارية

تستخدم المبادلات الحرارية بكثرة في مخازن التبريد، فهي مبردات الهواء التي تعمل على تبريد الهواء داخل مخازن التبريد، أو المكثفات الخاصة بنظام التبريد، أو وحدات استرجاع الطاقة في بعض النظم لتوفير الطاقة. والمبادل الحراري هو وحدة لتبادل الحرارة بين مائعين أحدهما ساخن والآخر بارد. ويبين شكل ٤,٦ رسمًا تخطيطيًا لمبادلين حراريين بسيطين. ونلاحظ من الشكل وجود نمطين لسريان المائعين بالنسبة لبعضهما البعض. في النمط الأول يسري المائعان البارد والساخن في نفس الاتجاه ويعرف هذا النمط بالسريان الموازي، أما في النمط الثاني، فيسري المائعان في اتجاهين متعاكسين، ويعرف هذا النمط بالسريان المعاكس. ويبين الشكل أيضا، تغير درجة حرارة المائعين البارد والساخن مع تغير المسافة من دخول المائع إلى المبادل الحراري، وقد تبقى درجة حرارة أحد المائعين ثابتة خلال مروره داخل المبادل الحراري، إذا تعرض هذا المائع للغليان أو التكثيف داخل المبادل الحراري.

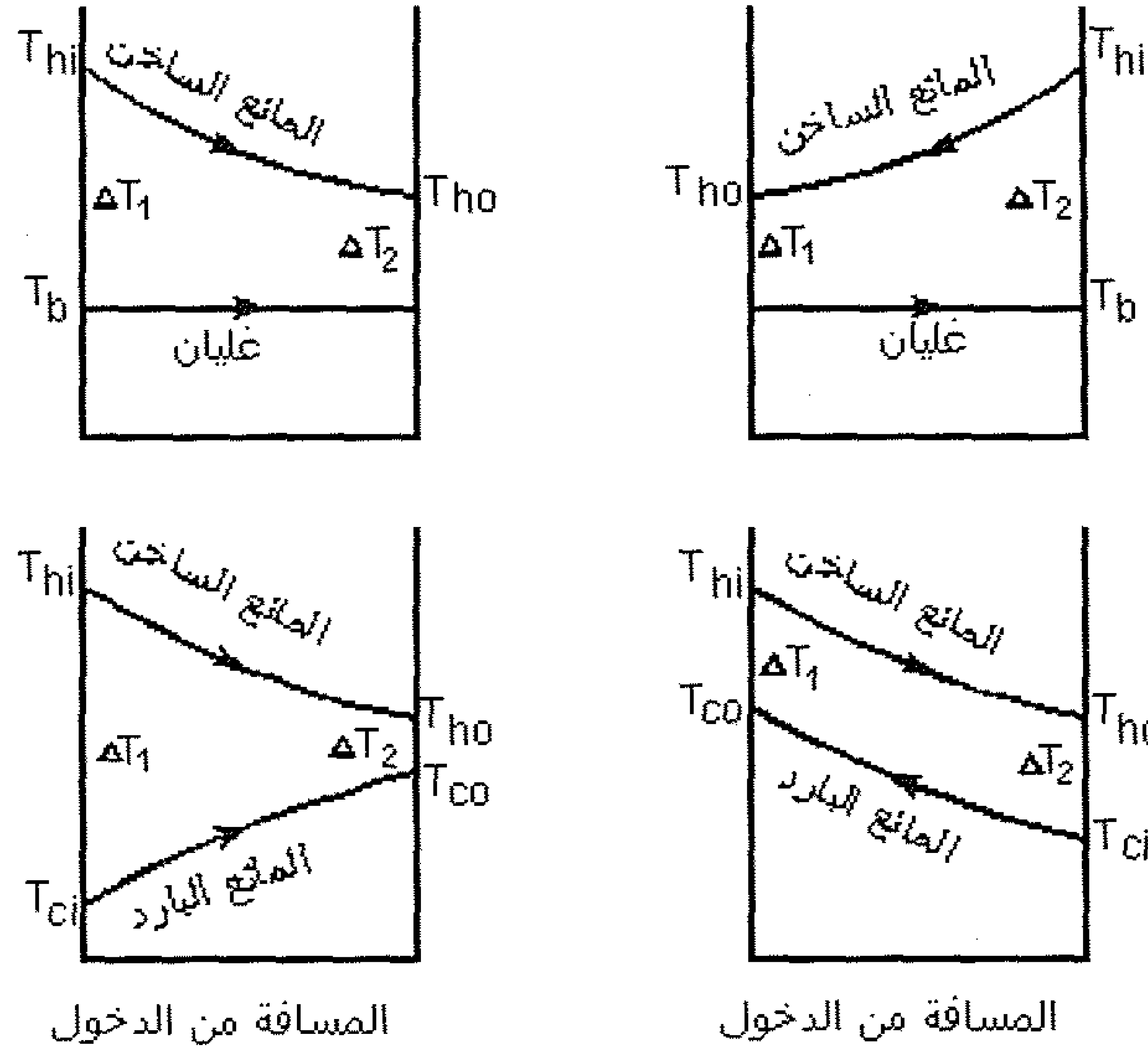
يحسب معدل انتقال الحرارة من المائع الساخن إلى المائع البارد، بواحدة من المعادلتين الأساسيتين الآتيتين، وذلك بفرض أن المبادل معزول جيدًا عن الجو المحيط:

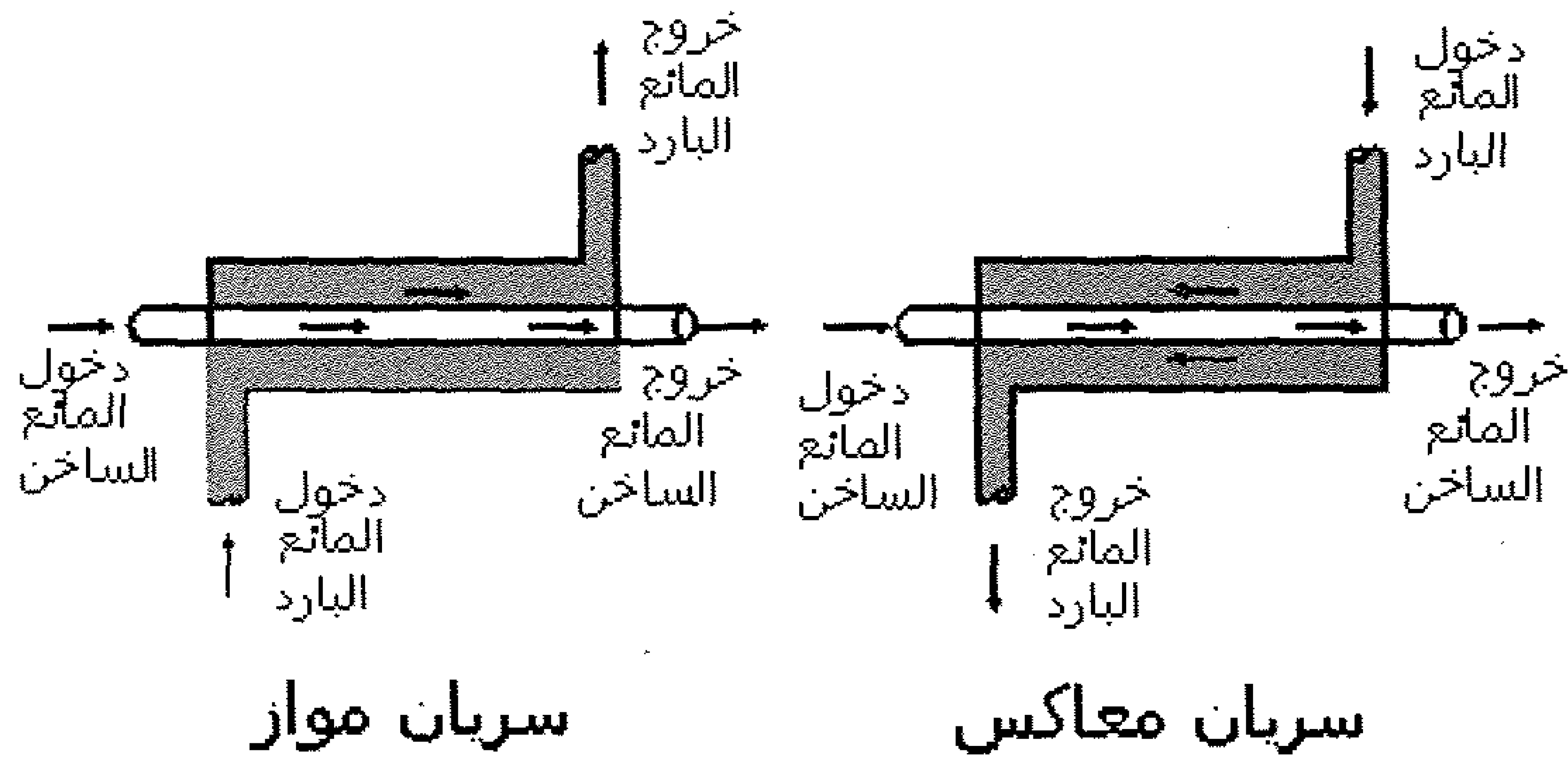
$$\dot{Q} = \dot{m}_h C_h \left(T_{hi} - T_{ho}\right) \tag{4.38}$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_c C_c \left(T_{co} - T_{ci}\right) \tag{4.39}$$

حيث $\dot{m}$ هي معدل سريان المائع، و C هي الحرارة النوعية للمائع عند ثبات الضغط، و T هي درجة الحرارة، ويعني التذييل h المائع الساخن، والتذييل c المائع البارد، والتذييل i الدخول، والتذييل o الخروج. كما يوجد نمط آخر

لسريان الموائع في المبادلات وهو نمط تعامد سريان المائع البارد مع المائع الساخن.





شكل ٤،٦ تغير درجات الحرارة للمائع الساخن والمائع البارد في المبادلات الحرارية عند سريان مواز أو سريان معاكس.

أيضًا، يحسب معدل انتقال الحرارة من أي من المعادلتين الآتيتين:

$$\dot{Q} = U_i A_i \Delta T_m \tag{4.40}$$

$$\dot{Q} = U_o A_o \Delta T_m \tag{4.41}$$

حيث U_i هو المعامل الكلي لانتقال الحرارة مسندة إلى المساحة الداخلية للمبادل الحراري (جهة المائع الساخن بشكل ٤,٦)، و U_o هو المعامل الكلي لانتقال الحرارة مسندة إلى المساحة الخارجية للمبادل الحراري (جهة المائع البارد بشكل ٤,٦) و ΔT_m هي الفرق اللوغاريتمي لدرجات الحرارة بين المائعين وتحسب U_i و U_o كما يلي:

$$\frac{1}{U_o A_o}=\frac{1}{U_i A_i}=\frac{1}{h_i\ A_i}+\frac{\ln\left(d_o/d_i\right)}{2\pi kL}+\frac{1}{h_o A_o}+R_i+R_o \qquad (4.42)$$

حيث d_i و d_o هما على التوالي القطر الداخلي والقطر الخارجي للأنبوب و L هي طول الأنبوب، k هي الموصلية الحرارية لمادة الأنبوب، و R_i و R_o هي المقاومة الحرارية للأوساخ على السطح الداخلي والسطح الخارجي للأنبوب على التوالي.

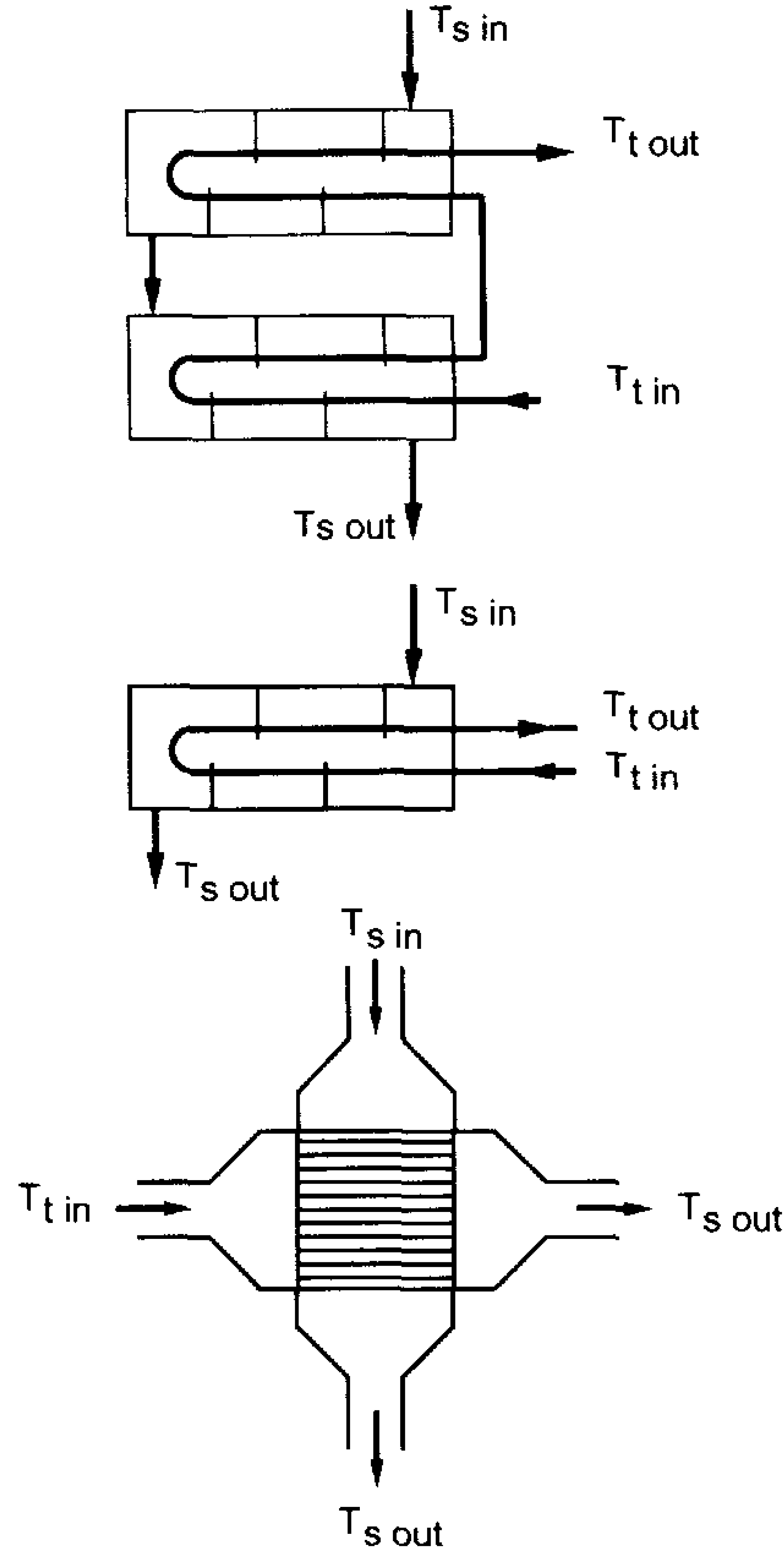
ويقدر الفرق اللوغاريتمي لدرجات الحرارة للمبادلين الحراريين بشكل ٤,٦ من العلاقة الرياضية الآتية:

$$\Delta T_m=\frac{\Delta T_1-\Delta T_2}{\ln(\Delta T_1/T_2)} \qquad (4.43)$$

حيث ΔT_1 و ΔT_2 هما فرق درجات الحرارة بين المائع الساخن والمائع البارد عند طرفي المبادل الحراري (انظر شكل ٤,٦).

ويمثل المبادلان الحراريان بشكل ٤,٦ شكلا بسيطًا للمبادلات الحرارية، ويختلف شكل هذه المبادلات في العديد من التطبيقات عن هذين الشكلين. ويبين شكل ٤,٧ رسما تخطيطيا لأشكال بعض المبادلات الحرارية الأخرى. ونلاحظ وجود أنواع أخرى للمبادلات الحرارية غير المبادلات ذات السريان الموازي وذات السريان المعاكس. وتعتبر العلاقات السابقة صحيحة لجميع أنواع

المبادلات الحرارية ما عدا العلاقة الخاصة بحساب ΔT_m. ولقد اقترحَ العديد من الباحثين حساب ΔT_m لأي شكل من المبادلات الحرارية من العلاقة الآتية:



(التذييل t يعني السريان داخل الأنابيب، والتذييل s يعني السريان داخل الغلاف)

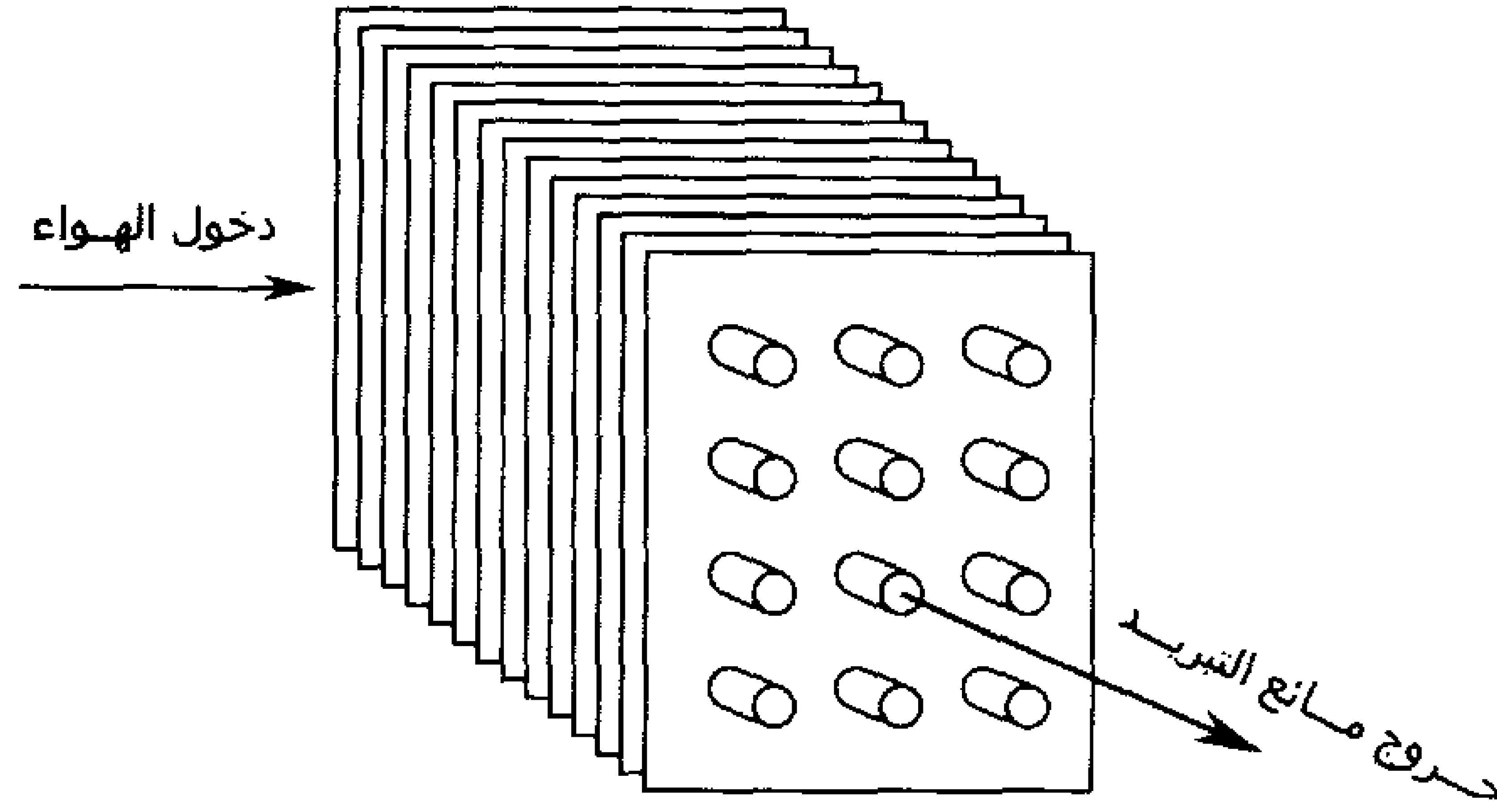
شكل ٤,٧ توضيح لبعض أنواع المبادلات الحرارية.

$$\Delta T_m = F(\Delta T_m)_c \tag{4.44}$$

حيث $(\Delta T_m)_c$ هي الفرق اللوغاريتمي لدرجات الحرارة بفرض سريان معاكس، و F هي معامل تصحيح. وتعطي مراجع المبادلات الحرارية قيم F للعديد من الأشكال المختلفة للمبادلات الحرارية [على سبيل المثال. انظر:2009 ,

Ozisik, ‹Incropera & Dewitt, 2002 ‹Kreith, & Bohn, 1993 ‹ ASHRAE .[Cengel, 1998 ‹1989

يستخدم العديد من المبادلات الحرارية أيضًا زعانف لتحسين معدل انتقال الحرارة. عندئذ يصبح حساب مساحة انتقال الحرارة والمعامل الكلي لانتقال الحرارة أكثر تعقيدًا من الحالة البسيطة المعطاة بشكل ٤,٦. ومن أهم المبادلات الحرارية المستخدمة للزعانف ملف تبريد الهواء في مخازن التبريد. ويبين شكل ٤,٨ رسمًا تخطيطيًا لملف تبريد هواء. لاحظ بالشكل وجود الزعانف من جهة الهواء، ولاحظ أيضًا أن نمط السريان عمودي على اتجاه سريان مائع التبريد داخل الأنابيب.



شكل ٤,٨ تبريد الهواء باستخدام سريان عمودي من نوع الأنبوب والزعنفة.

ومن الطرق الأخرى لحساب معدل الحرارة المنتقلة خلال سطح المبادل الحراري، طريقة الفاعلية. وتعرف الفاعلية لمبادل حراري بأنها نسبة كمية الحرارة المنتقلة فعليا على أكبر كمية حرارة ممكنة في المبادل الحراري كما يأتي:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{\max}} \qquad (4.45)$$

وتعرف $\dot{Q}_{\max}$ بأنها تساوي حاصل ضرب أعلى فرق درجة حرارة للمبادل وهو $(T_{hi}-T_{ci})$ في أقل القيمتين $(\dot{m}_h C_h)$ أو $(\dot{m}_c C_c)$. أي إن

$$\dot{Q}_{\max} = (\dot{m}C)_{\min}(T_{hi}-T_{ci}) \tag{4.46}$$

فلو فرضنا أن $(\dot{m}C)_{\min} = \dot{m}_h C_h$ فإن الفاعلية تصبح

$$\varepsilon = \frac{(\dot{m}C)_h (T_{hi}-T_{ho})}{(\dot{m}C)_{\min}(T_{hi}-T_{ci})} = \frac{(\dot{m}C)_c (T_{co}-T_{ci})}{(\dot{m}C)_h (T_{hi}-T_{ci})} \tag{4.47}$$

وتعرف $(\dot{m}C)_{\min}$ في المعادلتين السابقتين بأنها القيمة الصغرى من $\dot{m}_h C_h$ و $\dot{m}_c C_c$.

كما يُعرف عدد وحدات الانتقال (NTU = number of transfer unit) بأنه نسبة UA على $(\dot{m}C)_{\min}$، أي أن

$$\text{NTU} = \frac{UA}{(mC)_{\min}} \tag{4.48}$$

كما يمكن تعريف نسبة السعة الحرارية C_r بالمعادلة الآتية:

$$C_r = \frac{(\dot{m}C)_{\min}}{(\dot{m}C)_{\max}} \tag{4.49}$$

وتوجد في كتب انتقال الحرارة العديد من الخرائط التي تعطي تغير الفاعلية مع NTU و C_r. بل توجد معادلات للفاعلية كدالة في هذين المتغيرين أي إن

$$\varepsilon = \text{f}(\text{NTU}, C_r) \tag{4.50}$$

وتحسب قيمة ε من خرائط خاصة بذلك في العديد من المراجع [مثلا، انظر: Ozisik 1989, Kreith & Bohn 1993، وغيرهما]. وبمعرفة قيمة ε ، يُحسب معدل الحرارة المنتقلة في المبادل الحراري كما يلي:

$$\dot{Q} = \varepsilon(\dot{m}c)_{\min}\left(T_{hi} - T_{ci}\right) \qquad (4.51)$$

وهى المعادلة البديلة للمعادلة التي تستخدم الفرق اللوغاريتمي لدرجات الحرارة لحساب معدل انتقال الحرارة في المبادل الحراري.

الرموز ومعانيها للفصل الرابع

A	المساحة [م^{2}]
C_c	الحرارة النوعية للمائع البارد [كجول/كجرام.كلفن °م]
C_h	الحرارة النوعية للمائع البارد [كجول/كجرام.كلفن °م]
d	القطر [م]
f	معامل الاحتكاك [−]
F	معامل التصحيح لفرق درجات الحرارة اللوغارتمي [−]
Gr	رقم جراشوف [−]
h	معامل انتقال الحرارة بالحمل [وات/(م^{2}.كلفن)]
k	معامل الموصلية [وات/(م.كلفن)]
K	معامل فقد الضغط [−]
$\dot{m}$	معدل السريان [كجم/ث]
NTU	عدد و حدات الانتقال [−]
Nu	رقم نوسولت [−]
p	الضغط [باسكال أو كيلو باسكال]
Pr	رقم برانتل [−]
$\dot{Q}$	معدل انتقال الحرارة [وات]
R	المقاومة الحرارية [°م/وات]
Re	رقم رينولدز [−]
U	معامل انتقال الحرارة الكلي [وات/(م^{2}.كلفن)]
u	الطاقة الداخلية النوعية [كجول/كجم]
V	السرعة [م/ث]
$\dot{V}$	معدل السريان الحجمي [م^{3}/ث]

التذييل

c	المائع البارد
h	المائع الساخن
i	عند الدخول
max	القيمة العليا
min	القيمة الدنيا
o	عند الخروج
s	الغلاف
t	الأنبوب

الحروف الإغريقية

ΔT_m	الفرق اللوغارتمي لدرجات الحرارة [°م]
β	معامل التمدد الحجمي [كلفن$^{-١}$]
δ	السمك [م]
ε	معامل الانبعاثية الإشعاعية لجسم [–] أو فعالية المبادل الحراري [–]
η_f	كفاءة الزعنفة [–]
η_s	كفاءة السطح [–]
μ	اللزوجة الديناميكية [باسكال.ث]
ν	اللزوجة الكيناماتية [م^٢/ث]
ρ	الكثافة [كجم/م^٣]
σ	ثابت ستيفان وبولتزمان [=٥,٦٧×١٠$^{-٨}$ وات/(م^٢. وات.كلفن^٤)]

الفصل الخامس

متطلبات ومواصفات التبريد
لحفظ الأغذية

٥,١ مقدمة

نعالج في الفصل الحالي العوامل التي تؤدي إلي تلف وفساد الأغذية وكيفية التغلب على هذه العوامل لحفظ الأغذية لفترات طويلة. نتعرض بعد ذلك لظاهرتي فقد الماء من المواد الغذائية الطازجة والحرارة المصاحبة لتنفسها. وفى نهاية الفصل نقدم الخواص الحرارية للمواد الغذائية, ثم الشروط المثلى (درجة حرارة ورطوبة نسبية) اللازمة لتخزين هذه المواد.

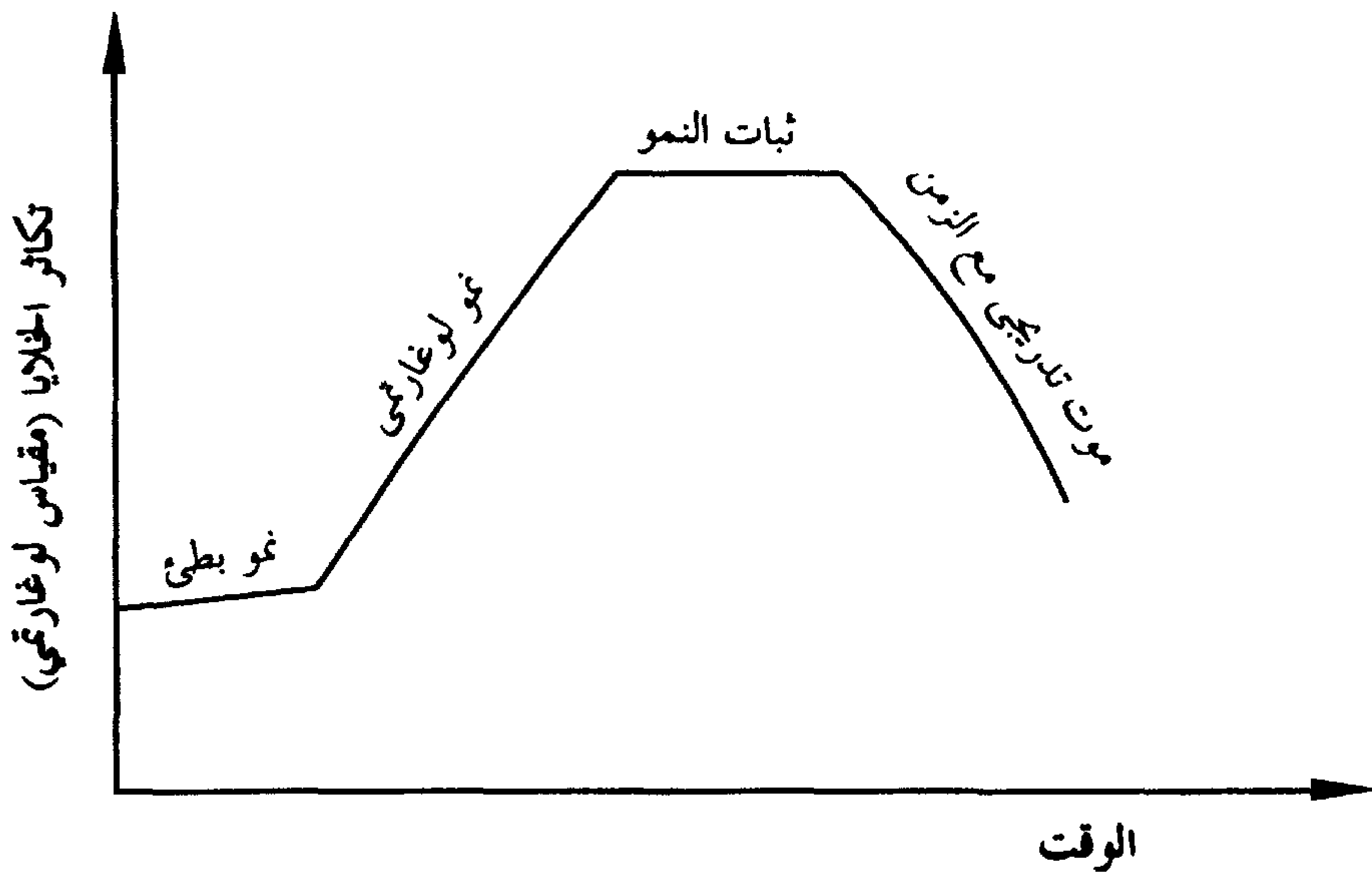
٥,٢ أسباب تلف الأغذية

يقصد بتلف أو فساد المواد الغذائية أن يتغير مظهر هذه المواد ومذاقها ورائحتها, وقد تصبح سامة أو ضارة للاستخدام الآدمي. وتظهر هذه التغيرات نتيجة عمليات فسيولوجية وكيميائية بالأغذية يسببها نمو بعض الكائنات المجهرية في هذه الأغذية ونتيجة نشاط بعض الأنزيمات بها. وتشمل الكائنات المجهرية التي تؤدي إلى فساد الأغذية البكتريا والفطريات والخمائر، وإن كانت البكتريا هي أهم الكائنات المجهرية التي تؤدي إلى فساد المأكولات، وتصل الكائنات المجهرية إلي المواد الغذائية من عدة مصادر: محمولة بالهواء و/أو الحشرات الطائرة والزاحفة، أو بالحيوانات أو الإنسان.

تنمو الكائنات المجهرية على المواد الغذائية مسببة تلفها، إلا أن معدل هذا النمو يعتمد بدرجة كبيرة على الظروف البيئية المحيطة من درجة حرارة ورطوبة ونسبة أكسجين بالهواء المحيط. وبالطبع توجد ظروف بيئية مثلى يصل عندها نمو

هذه الكائنات إلى أقصى معدل للنمو. كما توجد أيضا ظروف أخرى مثلى يقف عندها معدل هذا النمو إلى أدنى قيمة له، أو ينعدم هذا النمو كليا.

يمر نمو الكائنات المجهرية في المادة الغذائية بأربع مراحل متتالية هي كما يلي (انظر شكل ٥,١):



شكل ٥,١ مراحل نمو الكائنات المجهرية مع الزمن [ASHRAE 1994].

أولا مرحلة النمو البطئ، وهى أولى مراحل نمو الكائنات المجهرية في المنتج الغذائي ويعزى بطء النمو في هذه المرحلة إلي تأقلم هذه الكائنات مع الظروف البيئية الجديدة التي وجدت بها. بانتهاء هذه المرحلة تبدأ المرحلة الثانية وهي النمو اللوغاريتمي لهذه الكائنات, ويتزايد معدل النمو باضطراد مع مرور الزمن حتى تصل هذه المرحلة إلى نهايتها. تبدأ المرحلة الثالثة بعد ذلك، وتتميز هذه المرحلة بثبات نمو هذه الكائنات المجهرية مع الزمن. وتستمر المرحلة الثالثة

لفترة زمنية تبدأ بعدها المرحلة الرابعة والأخيرة، وهي المرحلة التي تموت فيها الكائنات المجهرية تدريجيا مع الزمن.

ويلزم التنويه هنا أنه يجب عدم السماح للكائنات المجهرية بالنمو في المرحلة اللوغاريتمية، حيث يصعب التحكم في نموها في هذه المرحلة، ويجب اتخاذ الأسباب للمحافظة على نمو هذه الكائنات فقط في المرحلة الأولى، أي مرحلة النمو البطيء.

٥,٣ حفظ الأغذية بالتبريد

يوجد ثلاث وسائل يفضل العمل بها مجتمعة (إذا أمكن) للمحافظة على المواد الغذائية في حالة جيدة. وتتلخص هذه الوسائل في الآتي:

أ) الحيلولة دون تلوث المواد الغذائية بالكائنات المجهرية الضارة، أو الإقلال ما أمكن من هذا التلوث.

ب) منع أو إبطاء معدل نمو الكائنات المجهرية بالمواد الغذائية.

ج) إبادة الكائنات المجهرية الموجودة بالمواد الغذائية.

في أولى الوسائل السابقة، تتخذ الاحتياطات والسبل لمنع تلوث المواد الغذائية بالكائنات المجهرية. في هذا السياق يجب استخدام مرشحات هواء (فلاتر) دقيقة وعدم السماح ببلل هذه المرشحات, وأن تكون دائما جافة. أيضا يجب تصميم غرف التخزين عند ضغط هواء أعلى من ضغط الهواء خارجها لمنع تسرب الهواء الخارجي الذي قد يحمل تلوثا إلي داخل غرف التخزين. كما يجب عدم السماح بأي تكثيف لبخار الماء داخل غرف التخزين لمنع وجود أي بلل داخل هذه الغرف (يساعد البلل على نمو الكائنات المجهرية). كما يوصى بالحيلولة دون تجمع الماء المتكثف من ملفات التبريد أسفل هذه الملفات وإنما يجب صرفه فور تساقطه إلى شبكة الصرف.

لمنع أو إبطاء نمو الكائنات المجهرية طبقا للوسيلة الثانية لحفظ المواد الغذائية، دعنا نتعرف أولا على العوامل التي تؤثر في نمو هذه الكائنات. تنقسم هذه العوامل إلي قسمين: ذاتي وخارجي. تشمل العوامل الذاتية نوع المادة الغذائية والتكوين البيولوجي لهذه المادة، ونشاط الماء والأس الهيدروجيني بها، إضافة إلى الكائنات المجهرية الموجودة بالمادة الغذائية. ويقصد بنشاط الماء في المادة الغذائية بأنه مدى توفر الماء بالمادة الغذائية لنمو الكائنات المجهرية الدقيقة بها. لهذا يعرف نشاط الماء a_w بأنة نسبة ضغط بخار المادة الغذائية إلى ضغط بخار الماء الموجود بها. وبالطبع هناك حد أدنى لنشاط الماء ليسمح بنمو كل نوع على حدة من الأنواع المختلفة للكائنات المجهرية. ويعتمد هذا الحد الأدنى على نوع المادة الغذائية [ASHRAE 1994] ويعرف الأس الهيدروجيني بأنه مقياس حمضية أو قلوية أي محلول، وتتراوح قيمة هذا الأس الهيدروجيني بين صفر إلى ١٤، ويكون المحلول متعادلا عندما يكون قيمة هذا الأس ٧ وتزداد قلوية المحلول كلما ارتفعت قيمة الأس الهيدروجيني، وتزداد حمضية المحلول كلما قلت قيمة الأس الهيدروجيني. وتفضل معظم الكائنات المجهرية المحاليل المتعادلة, حيث يكون معدل نمو هذه الكائنات أفضل ما يمكن، كما أن معظمها لا يمكنه النمو في المحاليل الحمضية نسبيا. ونلاحظ أنه يصعب إبطاء معدل نمو الكائنات المجهرية الضارة التي قد توجد بالمواد الغذائية، عن طريق التحكم في العوامل الذاتية، نظرًا لأن هذه العوامل تغير من خواص المادة الغذائية، وتغيير هذه العوامل سوف يؤدى إلى تغيير شكل ومذاق المادة الغذائية.

وتشمل العوامل الخارجية التي تؤثر في الكائنات المجهرية: درجة الحرارة والرطوبة النسبية, ونسبة الأكسجين بالهواء المحيط بالمادة الغذائية. وللتحكم في نمو الكائنات المجهرية بالمواد الغذائية يمكن التحكم بواحد أو أكثر من العوامل الخارجية. فمثلا بخفض درجة الحرارة إلى ما دون ٤°م يمكن إلى حد كبير الإبطاء

بدرجة ملحوظة من نمو معظم الكائنات المجهرية التي تؤدي إلي تلف المواد الغذائية الطازجة. إلا أنه لا يمكن تعميم هذه القاعدة على جميع الفواكه والخضراوات, حيث يكون التبريد ضارًا في بعض الأحيان ولا يفيد. فمثلا، لا ينصح بتبريد الموز والكمثرى إلى درجات حرارة متدنية.

ويمكن الحيلولة دون نمو الكائنات المجهرية بالمادة الغذائية، إذا أمكن تجميد هذه المادة. وفى الحقيقة، يعمل التجميد على حفظ المادة الغذائية عند نفس حالتها السابقة قبل التجميد، ولا يعمل التجميد بالطبع على تحسين حالة المادة الغذائية مقارنة بحالتها قبل التجميد. وعمومًا يجب عند استخدام التجميد كوسيلة للمحافظة على حالة المادة الغذائية لفترة طويلة أن تكون درجة حرارة التجميد أقل من −١٨°م.

ويساعد التحكم في الرطوبة النسبية، إذا أمكن ذلك، في الحد من نمو الكائنات المجهرية بالمادة الغذائية. إلا أن هناك القليل الذي يمكن عمله في هذا الاتجاه داخل غرف التخزين, حيث يلزم عدم خفض الرطوبة النسبية لهواء غرف التخزين عن قيمة معينة للحد من فقد الماء من المواد الغذائية، وذلك للمحافظة على هذه المواد في حالتها الطازجة عند درجة حرارة فوق درجة التجميد. وكما قدمنا سابقا أيضا إمكانية التحكم في نمو الكائنات المجهرية بالمواد الغذائية، عن طريق التحكم في نسبة الأكسجين بهواء غرف التخزين، إلا أن هذه الطريقة لا يفضل أخذها في الاعتبار هنا نظرا لصعوبة تطبيقها عمليا.

في الوسيلة الثالثة للمحافظة على المواد الغذائية في حالة جيدة، يتم القضاء على الكائنات المجهرية بأحد طرق التعقيم أو بإضافة مواد حافظة. ولا تدخل هذه الطرق ضمن موضوع الكتاب، وبالتالي لا نقوم بتقديمها هنا.

٥,٤ تنفس الفواكه والخضراوات الطازجة

تتنفس جميع الفواكه والخضراوات الطازجة شأنها كشأن جميع الكائنات الحية للحصول على الطاقة اللازمة للعمليات الحيوية المختلفة. ويتم في عملية التنفس حرق الجلوكوز بهذه الفواكه والخضراوات بالأكسجين, وإنتاج ثاني أكسيد الكربون وبخار الماء بالإضافة إلى الطاقة. ويصاحب عملية التنفس طاقة حرارية تُنقل إلى الهواء المحيط, وبالتالي يجب أخذها في الاعتبار كجزء من عمل التبريد. وتقل هذه الطاقة بانخفاض درجة الحرارة للفواكه والخضراوات. ويبين جدول ٥,١ حرارة التنفس لفواكه وخضروات طازجة عند درجات حرارة مختلفة. ويلاحظ بالطبع اعتماد قيمة هذه الحرارة على نوع الفاكهة والخضراوات المخزنة. ونظرًا لاعتماد هذه القيمة أيضا على الموطن الأصلي لكل نوع مما يصّعُب معه الحصر، لذا يلزم التنويه بأن القيمة المعطاة بجدول ٥,١ هي الحد الأعلى المتوقع لكل نوع, بصرف النظر عن الموطن. ويبين المثال التالي استخدام جدول ٥,١.

مثال ٥,١

احسب حرارة التنفس لمقدار ٥ طن من الفراولة عند درجة حرارة قدرها ١٠°م.

الحل

من جدول ٥,١ نجد أن حرارة التنفس عند ١٠°م لكل كيلو جرام هي ٢٨١,٤ ملي وات /كجم، عندئذ يمكن حساب حرارة التنفس للمقدار الموجود من الفراولة كما يلي:

$$\dot{Q} = 5000 \times 281.4 \times 10^{-3} = 1407 \text{ W} = 1.407 \text{ kW}$$

جدول ٥,١ حرارة التنفس للفواكه والخضراوات الطازجة عند درجات حرارة مختلفة (بتصرف من ASHRAE 1993).

	حرارة التنفس، ملي وات / كجم		
النوع	صفر درجة مئوية	١٠°م	٢٠°م
بامية	٠	٢٥٩	٧٧٤,٥
برتقال	٩,٢	٤٠,٣	٨٩,٢
بسلة	٢٢٤,١	٠	١٦٣٠,٠
بصل أخضر	٦٥,٩	١٧٤,٦	٤٦٠,٨
بصل جاف	٨,٧	٢١,٣	٥٠,٠
بطيخ	٠	٢٢,٣	٧٤,٢
تفاح	٢,٤	٣٥,٩	١٦٦,٨
تين	٠	٦٨,٤	٢٨١,٨
ثوم	٣٢,٥	٢٨,٦	٥٣,٨
جريب فروت	٠	٠	٥٢,٤
جزر	٤٥,٦	٩٣,١	٢٠٩,٠
خرشوف	١٣٣,٤	٢٩١,٥	٦٩٢,٠
خس	٨٦,٤	١١٨,٨	٢٩٧,٨
خوخ	١٨,٩	٠	٣٠٣,٦
ذرة	١٢٦,١	٣٣٢,٢	٨٥٥,٥
زيتون	٠	٠	١٤٥,٥
شمام	٠	٤٦,١	١٩١,٦
عنب	٨,٢	٢٢,٨	٩٧,٠
قرنبيط	٧١,٣	١٤٤,٥	٢٣٨,١
كرنب	٤٠,٣	٩٨,٤	٠
كمثرى	٢٠,٤	٦٣,٠	٢٦٦,٧
كيوي	٨,٣	٣٨,٩	٥٧,٣
لوبيا	١٠٣,٨	١٧٢,٦	٨٠١,١
ليمون	٠	٠	٦٧,٤
مانجو	٠	٠	٤٤٩,١
مشمش	١٧,٠	٥٥,٨	١٥٥,٢
موز أخضر	٠	٠	١٥٥,٢
موز ناضج	٠	٠	٢٤٢,٥
نعناع	٤٤,٥	٢٧٠,١	٦٧٣,٧

٥,٥ فقد الماء من الفواكه والخضراوات الطازجة

تذبل الفواكه والخضراوات بفقد بعض مائها إلى الهواء المحيط أثناء عملية العرق. ويؤدي فقد الماء إذا زاد عن حد معين إلى تغيير شكل الفواكه والخضراوات وفقدها رونقها وليونتها. كما يؤدي أيضا فقد الماء من الفواكه والخضراوات إلى نقص وزنها, وبالتالي فقد قيمة البيع لها. لذلك لا يجب أن يزيد فقد الماء من الفواكه والخضراوات الطازجة عن ٥٪ من قيمة الماء الموجود بها.

ويعتمد فقد الماء من الفواكه والخضراوات الطازجة على الفرق بين ضغط بخار الماء بالهواء المحيط وضغط التشبع لبخار الماء داخل هذه الفواكه والخضراوات. ونظرا لوجود الماء بالحالة السائلة داخل هذه الفواكه والخضراوات فيمكن كتابة هذا الفرق كما يلي:

$$\Delta p = (1-\phi)\, p_s \qquad (5.1)$$

حيث ϕ هي الرطوبة النسبية للهواء الموجودة به الفواكه والخضراوات و p_s هو ضغط التشبع للماء عند درجة حرارة الفواكه والخضراوات (وهى أيضا درجة حرارة الهواء المحيط). وللتعرف على المعادلة السابقة دعنا نفرض هواءً عند درجة حرارة قدرها ٥°م وهواء آخر عند درجة حرارة قدرها ١٥°م، وكلاهما عند رطوبة نسبية قدرها ٦٠٪. من جداول الماء المشبع نجد أن قيمة p_s عند ٥ و١٥°م على التوالي هي: ٠,٨٧٢ و ١,٧٠٥ كيلو بسكال، عندئذ يقدر فرق الضغط المحرك لفقد الماء من الفواكه والخضراوات على التوالي كما يلي:

$$T = 5\ ^{o}\mathrm{C}: \qquad \Delta p = (1-0.6)\times 0.872 = 0.349\ \mathrm{kP_a}$$

$$T = 15\ ^{o}\mathrm{C}: \qquad \Delta p = (1-0.6)\times 1.705 = 0.682\,\mathrm{kP_a}$$

أي إن نسبة الماء المفقود بالهواء عند ١٥°م إلى الماء المفقود من الهواء عند ٥°م تساوى تقريبا ٢، أي الضعف. نلاحظ الآن أنه إذا ارتفعت الرطوبة النسبية إلى ٩٠٪، لهواء عند ١٥° م فإن

$$\Delta P = (1-0.9)\times 1.705 = 0.1705 \text{ kPa}$$

عندئذ تقل النسبة السابقة إلى حوالي ٠,٥ بدلا من ٢,٠ .

نستنتج مما سبق أهمية قيمة كل من درجة الحرارة والرطوبة النسبية بالهواء المحيط بالفواكه والخضراوات الطازجة في حساب مقدار فقد الماء منها.

٥,٦ الخواص الحرارية للمواد الغذائية

يتطلب حساب حمل التبريد لغرف تخزين المواد الغذائية معرفة بعض الخواص الحرارية لهذه المواد، وهى بالتحديد: الحرارة النوعية للمواد الغذائية ودرجة الحرارة عند بداية التجمد لهذه المواد، بالإضافة إلى الحرارة الكامنة للتجميد في بعض المواد الغذائية التي قد تحتاج إلى تجميد. وتبين جداول ٥,٢ إلى ٥,٦ بعض الخواص الحرارية لبعض الخضراوات والفواكه واللحوم والأسماك ومنتجات الألبان والطيور، كدرجة حرارة بداية التجمد والحرارة الكامنة للتجميد [ASHRAE 2006] ولقد أوصت الجمعية الأمريكية لمهندسي التبريد والتكيف (ASHRAE) باستخدام معادلات زيبل [Siebel 1892] لتقدير الحرارة النوعية لجميع المواد الغذائية دون استثناء، وذلك بدلالة النسبة المئوية a لمحتوى الماء (بالكتلة) بهذه المواد [ASHRAE 1993] وتعطى هذه المعادلات كما يلي:

فوق درجة التجمد:

$$C_p = 0.033355\, a + 0.84 \qquad (5.2A)$$

تحت درجة التجمد:

$$C_p = 0.0126\, a + 0.84 \qquad (5.2B)$$

حيث C_p هي الحرارة النوعية بوحدات كيلو جول / كجم.°م

جدول ٥,٢ بعض الخواص الحرارية للخضراوات (بتصرف من ASHRAE 2006).

البند	نسبة محتوى الرطوبة %	درجة حرارة بداية التجمد °م	الحرارة النوعية فوق درجة التجمد كيلوجول/ كجم °م	الحرارة النوعية تحت درجة التجمد كيلوجول/ كجم °م	الحرارة الكامنة للتجميد كيلو جول/ كجم
باذنجان	٩٢,٠٣	-٠,٨	٤,٠٢	١,٨٣	٣٠٧
بامية	٨٩,٥٨	-١,٨	٣,٩٧	٢,٠٥	٢٩٩
بروكلي	٩٠,٦٩	-٠,٦	٤,٠١	١,٨٢	٣٠٣
بسلة خضراء	٧٨,٨٦	-٠,٦	٣,٧٥	١,٩٨	٢٦٣
بصل	٨٩,٦٨	-٠,٩	٣,٩٥	١,٨٧	٣٠٠
بطاطس	٧٨,٩٦	-٠,٦	٣,٦٧	١,٩٣	٢٦٤
بقدونس	٨٧,٧١	-١,١	٣,٩٣	١,٩٤	٢٩٣
ثوم	٥٨,٥٨	-٠,٨	٣,١٧	٢,١٩	١٩٦
جزر	٨٧,٧٩	-١,٤	٣,٩٢	٢,٠٠	٢٩٣
خرشوف	٨٤,٩٤	-١,٢	٣,٩٠	٢,٠٢	٢٨٤
خس	٩٥,٨٩	-٠,٢	٤,٠٩	١,٦٥	٣٢٠
خيار	٩٦,٠١	-٠,٥	٤,٠٩	١,٧١	٣٢١
ذرة	٧٥,٩٦	-٠,٦	٣,٦٢	١,٩٨	٢٥٤
سبانخ	٩١,٥٨	-٠,٣	٤,٠٢	١,٧٥	٣٠٦
طماطم	٩٣,٠٠	-٠,٦	٤,٠٢	١,٧٧	٣١١
عش الغراب	٩١,٨١	-٠,٩	٣,٩٩	١,٨٤	٣٠٧
فلفل أخضر	٩٢,١٩	-٠,٧	٤,٠١	١,٨٠	٣٠٨
قرع عسل	٩١,٦٠	-٠,٨	٣,٩٧	١,٨١	٣٠٦
قرنبيط	٩١,٩١	-٠,٨	٤,٠٢	١,٨٤	٣٠٧
كرنب	٩٢,١٥	-٠,٩	٤,٠٢	١,٨٥	٣٠٨
كرفس	٩٤,٦٤	-٠,٥	٤,٠٧	١,٧٤	٣١٦
كوسة	٩٤,٢٠	-٠,٥	٤,٠٧	١,٧٤	٣١٥
لفت	٩١,٨٧	-١,١	٤,٠٠	١,٨٨	٣٠٧
لوبيا، حبوب	٩٠,٢٧	-٠,٧	٣,٩٩	١,٨٥	٣٠٢

جدول ٥,٣ بعض الخواص الحرارية للفاكهة (بتصرف من ASHRAE 2006).

البند	نسبة محتوى الرطوبة %	درجة حرارة بداية التجمد °م	الحرارة النوعية فوق درجة التجمد كيلوجول/ كجم °م	الحرارة النوعية تحت درجة التجمد كيلوجول/ كجم °م	الحرارة الكامنة للتجميد كيلوجول/ كجم
أناناس	٨٦,٥٠	-١,٠	٣,٨٥	١,٩١	٢٨٩
برتقال	٨٢,٣٠	-٠,٨	٣,٨١	١,٩٦	٢٧٥
برقوق	٨٥,٢٠	-٠,٨	٣,٨٣	١,٩٠	٢٨٥
بطيخ	٩١,٥١	-٠,٤	٣,٩٧	١,٧٤	٣٠٦
بلح	٢٢,٥٠	-١٥,٧	٢,٣١	٢,٣٠	٧٥
تفاح	٨٣,٩٣	-١,١	٣,٨١	١,٩٨	٢٨٠
توت	٨٥,٦٤	-٠,٨	٣,٩١	١,٩٤	٢٨٦
تين	٧٩,١١	-٢,٤	٣,٧٠	٢,٢٥	٢٦٤
جريب فروت	٩٠,٨٩	-١,١	٣,٩٦	١,٨٩	٣٠٤
خوخ	٨٧,٦٦	-٠,٩	٣,٩١	١,٩٠	٢٩٣
زبيب	١٥,٤٢		٢,٠٧	٢,٠٤	٥٢
زيتون	٧٩,٩٩	-١,٤	٣,٧٦	٢,٠٧	٢٦٧
شمام	٨٩,٧٨	-١,٢	٣,٩٣	١,٩١	٣٠٠
فراولة	٩١,٥٧	-٠,٨	٤,٠٠	١,٨٤	٣٠٦
كرز	٨٦,١٣	-١,٧	٣,٨٥	٢,٠٥	٢٨٨
كمثرى	٨٣,٨١	-١,٦	٣,٨٠	٢,٠٦	٢٨٠
ليمون	٨٧,٤٠	-١,٤	٣,٩٤	٢,٠٢	٢٩٢
مانجو	٨١,٧١	-٠,٩	٣,٧٤	١,٩٥	٢٧٣
مشمش	٨٦,٣٥	-١,١	٣,٨٧	١,٩٥	٢٨٨
موز	٧٤,٢٦	-٠,٨	٣,٥٦	٢,٠٣	٢٤٨

جدول ٥,٤ بعض الخواص الحرارية للأسماك واللحوم والطيور ومنتجاتها (بتصرف من ASHRAE 2006).

البند	نسبة محتوى الرطوبة %	درجة حرارة بداية التجمد °م	الحرارة النوعية فوق درجة التجمد كيلوجول/ كجم °م	الحرارة النوعية تحت درجة التجمد كيلوجول/ كجم °م	الحرارة الكامنة للتجميد كيلو جول/ كجم
بط	٤٨,٥٠		٣,٠٦	٢,٤٥	١٦٢
بيض، بياض	٨٧,٨١	-٠,٦	٣,٩١	١,٨١	٢٩٣
بيض، صفار	٤٨,٨١	-٠,٦	٣,٠٥	٢,٢٥	١٦٣
بيض، كامل	٧٥,٣٣	-٠,٦	٣,٦٣	١,٩٥	٢٥٢
دجاج	٦٥,٩٩	-٢,٨	٤,٣٤	٣,٣٢	٢٢٠
ديك رومي	٧٠,٤٠		٣,٣٥	٢,٢٨	٢٣٥
سمك القد	٨١,٢٢	-٢,٢	٣,٧٨	٢,١٤	٢٧١
سمك الحدق	٧٩,٩٢	-٢,٢	٣,٧٥	٢,١٤	٢٦٧
سمك الهلبوت	٧٧,٩٢	-٢,٢	٣,٧٤	٢,١٨	٢٦٠
سمك الرنجة	٥٩,٧٠	-٢,٢	٣,٢٦	٢,٢٧	١٩٩
سمك الفرخ	٧٨,٧٠	-٢,٢	٣,٧١	٢,١٥	٢٦٣
سمك السلمون	٧٦,٣٥	-٢,٢	٣,٦٨	٢,١٧	٢٥٥
سمك تونة	٦٨,٠٩	-٢,٢	٣,٤٣	٢,١٩	٢٢٧
سمك أبيض	٨٠,٢٧	-٢,٢	٣,٧٧	٢,١٥	٢٦٨
سرطان البحر	٧٦,٧٦	-٢,٢	٣,٦٤	٢,١٥	٢٥٦
سمك، محار	٨٥,١٦	-٢,٢	٣,٨٣	٢,١٢	٢٨٤
جمبري (روبيان)	٧٥,٨٦	-٢,٢	٣,٦٥	٢,١٦	٢٥٣
لحم بقري سكالوب	٧٨,٥٧	-٢,٢	٣,٧١	٢,١٥	٢٦٢
لحم بقري، قطع	٥٥,١٨	–	٣,١٩	٢,٣٣	١٨٤
لحم بقري، كبد	٦٨,٩٩	-١,٧	٣,٤٧	٢,١٦	٢٣٠
لحم بقري ريش	٥٤,٥٤	–	٣,١٦	٢,٣٢	١٨٢
لحم بقري، شرائح	٦٤,٧٥	–	٣,٣٩	٢,١٨	٢١٦
لحم عجل	٧٥,٩١		٣,٦٥	٢,٠٩	٢٥٤
لحم غنم، قطع	٧٣,٤٢	-١,٩	٣,٦٠	٢,١٤	٢٤٥

جدول ٥,٥ بعض الخواص الحرارية للألبان ومنتجاتها، والمكسرات (بتصرف من ASHRAE 2006).

البند	نسبة محتوى الرطوبة %	درجة حرارة بداية التجمد °م	الحرارة النوعية فوق درجة التجمد كيلوجول/ كجم °م	الحرارة النوعية تحت درجة التجمد كيلوجول/ كجم °م	الحرارة الكامنة للتجميد كيلوجول/ كجم
ايس كريم، شوكولاتة	٥٥,٧٠	-٥,٦	٣,١١	٢,٧٥	١٨٦
ايس كريم، فانيليا	٦١,٠٠	-٥,٦	٣,٢٢	٢,٧٤	٢٠٤
ايس كريم، فراولة	٦٠,٠٠	-٥,٦	٣,١٩	٢,٧٤	٢٠٠
جبن، جودة	٤١,٤٦	-	٢,٨٧	٢,٧٧	١٣٨
جبن روكفورت	٣٩,٣٨	-١٦,٣	٢,٨٠	٣,٣٦	١٣٢
جبن سويسرى	٣٧,٢١	-١٠,٠	٢,٧٨	٢,٨٨	١٢٤
جبن شيدر	٣٦,٧٥	-١٢,٩	٢,٧٧	٣,٠٧	١٢٣
جبن مطبوخ	٣٩,١٦	-٦,٩	٢,٨٠	٢,٧٥	١٣١
جبن، موتزريلا	٥٤,١٤	-	٣,١٥	٢,٤٦	١٨١
زبد	١٧,٩٤	-	٢,٤٠	٢,٦٥	٦٠
قشدة، منزوعة الدسم	٨٠,٥٧	-	٣,٧٣	٢,١٦	٢٦٩
قشدة، كاملة الدسم	٥٧,٧١	-	٣,٢٥	٢,٣٢	١٩٣
لبن مبخر	٧٤,٠٤	-١,٤	٣,٥٦	٢,٠٨	٢٤٧
لبن كامل الدسم	٨٧,٦٩	-٠,٦	٣,٨٦	١,٨١	٢٩٣
لبن مجفف	٣,١٦	-	١,٨٠	-	١١
لبن مجفف ومحلى	٣,١٩	-	١,٦٩	-	١١
لبن مكثف	٢٧,١٦	-١٥,٠	٢,٣٥	-	٩١
لبن منزوع الدسم	٩٠,٨٠	-	٣,٩٥	١,٧٨	٣٠٣
مكسرات، جوز	٣,٦٥	-	٢,٠٩	-	١٢
مكسرات، فول سودانى	٦,٥	-	٢,٢٣	-	٢٢
مكسرات، لوز	٤,٤٢	-	٢,٢٠	-	١٥

جدول ٥,٦ بعض الخواص الحرارية للعصائر والمشروبات (بتصرف من ASHRAE 2006).

البند	نسبة محتوى الرطوبة %	درجة حرارة بداية التجمد °م	الحرارة النوعية فوق درجة التجمد كيلوجول/ كجم °م	الحرارة النوعية تحت درجة التجمد كيلوجول/ كجم °م	الحرارة الكامنة للتجميد كيلو جول/ كجم
عصير أناناس غير محلى	٨٥,٥٣	–	٣,٨١	١,٨١	٢٨٦
عصير برتقال	٨٩,٠١	–٠,٤	٣,٩٠	١,٧٦	٢٩٧
عصير برقوق	٨١,٢٤	–	٣,٧١	١,٨٧	٢٧١
عصير تفاح خالى من السكر	٨٧,٩٣	–	٣,٨٧	١,٧٨	٢٩٤
عصير توت وعنب	٨٥,٦٠	–	٣,٨١	١,٨٠	٢٨٦
عصير جريب فروت محلى	٨٧,٣٨	–	٣,٨٥	١,٧٨	٢٩٢
عصير جريب فروت غير محلي	٨٤,١٢	–	٣,٧٧	١,٨٢	٢٨١
عصير طماطم	٩٣,٩٠	–	٤,٠٣	١,٧١	٣١٤
عصير ليمون	٩٢,٤٦	–	٣,٩٩	١,٧٣	٣٠٩
عصير ليمون غير محلى	٩٢,٥٢	–	٣,٩٩	١,٧٣	٣٠٩
مياه غازية	٩٩,٩٠	–	٤,١٧	١,٦٣	٣٣٤
حليب بالشوكولاتة	٨٣,٥٨	–	٣,٧٨	١,٨٣	٢٧٩

مثال ٥,٢

أوجد الحرارة النوعية للجمبري عند درجة حرارة ٥°م وعند درجة حرارة قدرها – ٢٠°م. أيضا أوجد الحرارة الكامنة للتجمد.

الحل

من جدول ٥,٤ نجد أن محتوى الماء بالجمبري هو ٧٥,٨٦٪ و أن درجة حرارة بداية التجمد هي –٢,٢ °م. من الجدول أيضا نجد أن الحرارة النوعية عند درجة حرارة فوق التجمد هي ٣,٦٥ كيلو جول / كجم.°م، وتحت درجة التجمد هي ٢,١٦ كيلو جول / كجم. °م، وأن الحرارة الكامنة للتجمد هي ٢٥٣ كيلو جول / كجم.°م. باستخدام معادلات زيبل [Siebel 1892] يمكن حساب الحرارة النوعية فوق درجة التجمد كما يلي:

$$C_p = 0.033355 \times 75.86 + 0.84 = 3.37 \text{ kJ / kg }^{o}\text{C}$$

وتحت درجة التجمد كما يلي:

$$C_p = 0.0126 \times 75.86 + 0.84 = 1.796 \quad \text{kJ / kg }^{o}\text{C}$$

بالمقارنة مع القيم التي حصلنا عليها من الجدول, نجد أن هناك اختلاف بسيط في قيمة الحرارة النوعية وهو اختلاف يمكن تجاوزه في الحسابات الهندسية.

٥,٧ الشروط المثلى لتخزين المواد الغذائية

تبين جداول ٥,٢ إلى ٥,٦ درجة الحرارة والرطوبة النسبية الموصى بها لتخزين بعض أنواع الفاكهة والخضراوات الطازجة واللحوم والأسماك والألبان

ومنتجاتها الألبان ومنتجات الدواجن والمشروبات والعصائر, وذلك طبقا لجمعية ASHRAE (ASHRAE 1994).

تحدد درجة حرارة التخزين للفواكه والخضراوات الطازجة بحيث تعمل على:

أ) خفض معدل فساد الفواكه والخضراوات إلى أقل معدل ممكن لها.

ب) حماية الفواكه والخضراوات من التجمد مما يفسد شكلها.

ج) حماية الفواكه والخضراوات من إصابة الصقيع التي قد تعيب بعض أنواعها.

ولتوضيح هذا الأمر, دعنا ندرس معدل فساد إحدى الفواكه كما هو موضح بجدول ٥,٧. فكما هو ملاحظ من الجدول يقل معدل فساد الفاكهة بخفض درجة الحرارة. ولكن بالوصول إلى درجة حرارة – ١°م نجد أن هذه الدرجة تسبب تجمد الفاكهة مما يفسد شكلها. عندئذ قد يفضل تخزين هذه الفاكهة عند درجة حرارة قدرها ١ °م بدلا من – ١° م. ومن المعروف أن درجات الحرارة المنخفضة التي فوق درجة حرارة التجمد تسبب ما يعرف بإصابة الصقيع لبعض أنواع الفاكهة والخضراوات. ويعتبر الموز خير مثال على ذلك. في مثل هذه الحالات تُرفع درجات حرارة التخزين إلى أقل درجة حرارة لا تسبب إصابة الصقيع للفاكهة أو الخضار المخزون.

وتحدد الرطوبة النسبية لتخزين الفواكه والخضراوات الطازجة, بحيث لا تساعد على انكماش وتشقق السطح الخارجي لها نتيجة فقد جزء من مائها إلى الهواء مما يعطيها شكلا غير مقبولا. وتجدر الإشارة هنا إلى أن فقد من ٣ إلى

٦٪ من محتوى الماء لأي فاكهة أو خضار يسبب شكلا غير مقبولا لها بالإضافة إلى خسارة لا يستهان بها من قيمة البيع لهذه الفواكه والخضراوات.

جدول ٥,٧ العلاقة التقريبية بين معدل فساد الأغذية الطازجة مع درجة الحرارة لإحدى أنواع الفاكهة.

درجة الحرارة، °م	معدل الفساد
٢٠	٨ إلى ١٠
١٠	٤ إلى ٥
٥	٣
٣	٢
صفر	١,٢٥
١-	١

وللمحافظة على المواد الغذائية بحالة جيدة ينصح عامة بالاتي:

أ) المحافظة على درجة الحرارة في جميع الأماكن داخل غرفة التخزين بفرق لا يزيد من ٠,٥ إلى ١°م عن درجة الحرارة الموصى بها للتخزين.

ب) المحافظة على الرطوبة النسبية بفرق لا يزيد عن من ٣ إلى ٥٪ عن قيمة الرطوبة النسبية الموصى بها للتخزين.

ج) العمل على توزيع الهواء دخل غرفة التخزين لتحقيق الشرطين (أ) و(ب) عالية.

د) التنظيف الدوري لغرفة التخزين للتخلص من العفن والفطريات التي قد تنمو على أسطح وجدار غرف التبريد بعد مدة طويلة والعمل المستمر على تعقيم هواء هذه الغرف.

هـ) نقل المنتجات الغذائية من غرف التخزين بأسرع ما يمكن إلى منافذ البيع وذلك للحد من تكثيف بخار الماء الذي قد ينتج على سطح المنتجات الغذائية أثناء عملية نقلها. ويعمل هذا التكثيف على زيادة معدل فساد هذه الأغذية.

الرموز ومعانيها للفصل الخامس

a	نسبة محتوى الماء في المادة [٪]
a_w	نشاط الماء
p_s	ضغط التشبع [باسكال]
$\dot{Q}$	معدل انتقال الحرارة [وات]

الحروف الإغريقية

Δp	الفرق في الضغط
φ	الرطوبة النسبية

الفصل السادس

الاعتبارات الهندسية لبناء وتشغيل مخازن التبريد

٦,١ تقديم

هناك نوعان من مخازن التبريد: مخازن التبريد للإنتاج ومخازن التبريد للتوزيع. تعرف مخازن التبريد للإنتاج بأنها مخازن التبريد التي تبنى بجوار أو داخل أحد مراكز الإنتاج بغرض تخزين منتجات هذه المراكز. وتعرف مخازن التبريد للتوزيع بأنها مخازن التبريد التي تستخدم لتخزين البضائع المختلفة لحين توزيعها فيما بعد. وتنقسم مخازن التبريد أيضا تبعًا لدرجات حرارة التخزين بها إلى مخازن تبريد تعمل عند درجات حرارة فوق درجة التجمد وأخرى تحت درجة التجمد، وقد يحوي مخزن التبريد العديد من غرف التبريد يعمل بعضها فوق درجة حرارة التجمد، بينما يعمل البعض الآخر تحت درجة حرارة التجمد.

تبنى مخازن التبريد عادة في مواقع يسهل الوصول إليها بوسائل نقل البضائع المختلفة. أيضًا، يجب أن يكون إمداد الموقع بالماء والكهرباء والصرف متاحًا وأن تكون تكلفة الأرض منخفضة نسبيًا بحيث لا تمثل عائقًا اقتصاديًا لبناء مخزن التبريد. ويفضل في معظم الأحوال أن يكون مخزن التبريد في طرف المدينة بعيدًا عن الأماكن المزدحمة، أو خارج المدن بالقرب من أماكن إنتاج البضائع والمنتجات التي تحتاج إلى تخزين بمخازن التبريد.

يتطلب بناء مخازن التبريد مواصفات خاصة تختلف عن المواصفات اللازمة لبناء المنشآت الأخرى. وفي الفصل الحالي نقدم عرضًا لهذه المواصفات، دون التعرض للتفاصيل الإنشائية ولكن فقط عرض لأهم

المواصفات الهندسية الواجب أخذها في الاعتبار عند بناء وتشغيل مخازن التبريد.

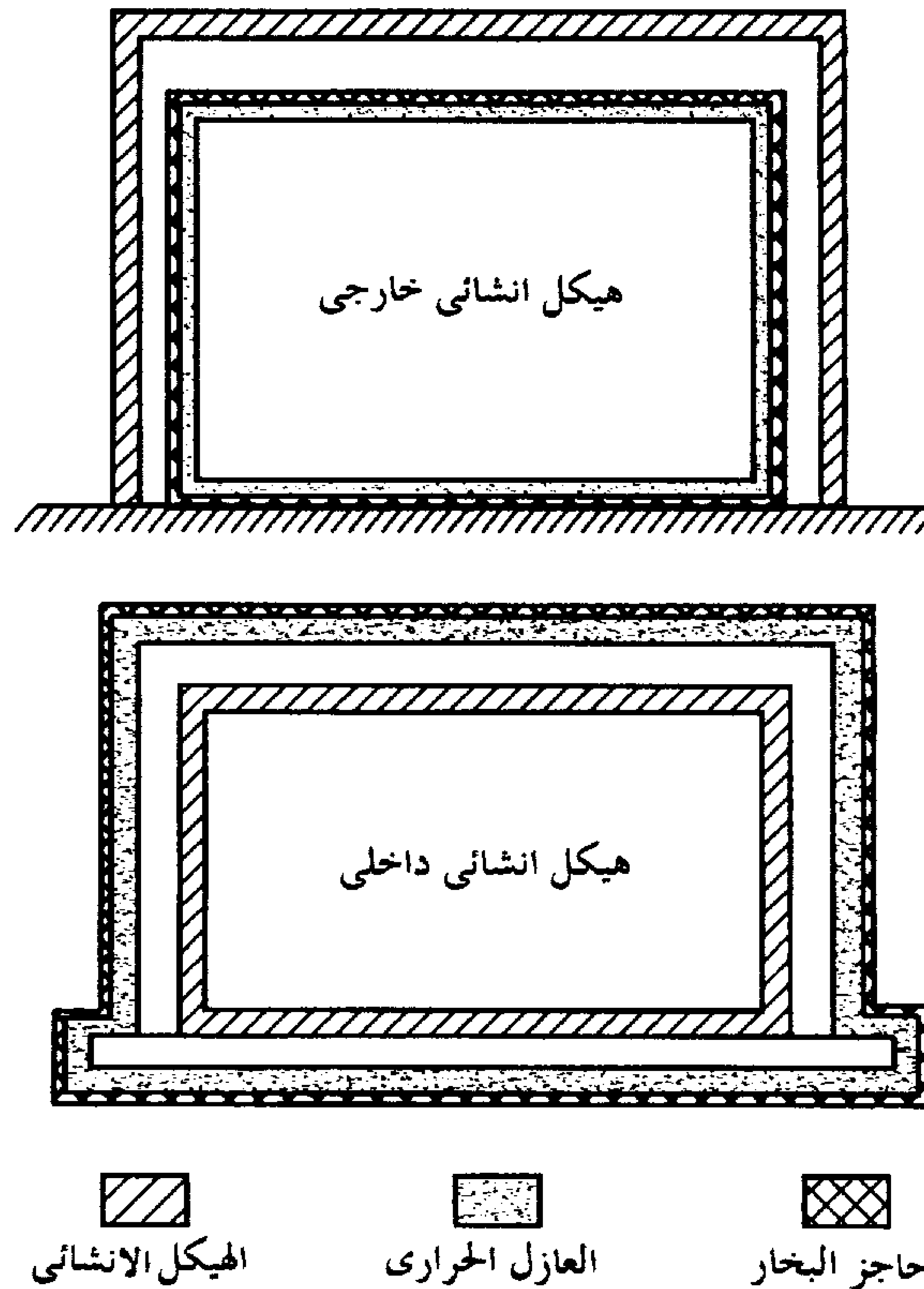
٦,٢ طرق البناء

تبنى مخازن التبريد في معظم الأحيان من دور واحد، ويستخدم عادة عند بناء هذه المخازن هيكل معدني أو هيكل خرساني، وإن كان الهيكل المعدني هو الأكثر شيوعًا عند بناء مخازن التبريد. ويتيح استخدام الهيكل الخرساني تشيد المخزن لأطوال تصل إلى ٦٠ مترًا دون الحاجة إلى وضع أي أعمدة داخلية. أيضًا، تستخدم الخرسانة المسلحة لبناء مخازن التبريد.

ويختلف بناء مخازن التبريد عن المباني الأخرى في نقطتين أساسيتين، هما: العزل الحراري وحاجز بخار الماء. فنظرًا لعمل مخازن التبريد عند درجات حرارة أقل كثيرًا من درجة حرارة الجو الخارجي، وقد تصل درجة حرارة التخزين إلى درجات حرارة أقل كثيرًا من درجة حرارة الصفر، لذا لزم عزل هذه المخازن حراريا لتوفير الطاقة اللازمة للتبريد. أيضًا، يلزم وضع حاجز لمنع تسرب بخار الماء من الهواء الخارجي إلى داخل مخزن التبريد، حيث يتكثف هذا البخار مكونًا صقيعًا داخل المخزن، مما يعوق أداء معدات التبريد ويقلل من كفاءة عملها.

يوضع العازل الحراري وحاجز البخار في مخازن التبريد بواحدة من طريقتين أساسيتين. في الطريقة الأولى يوضع العازل الحراري وحاجز البخار داخل الهيكل الإنشائي لمخزن التبريد، وفي الطريقة الثانية يوضع العازل الحراري وحاجز البخار خارج الهيكل الإنشائي (انظر شكل ٦,١). وتهدف كلتا الطريقتين إلى وجود غلاف كامل من حاجز البخار حول مخزن التبريد. ولا

يجب بأي حال من الأحوال اختراق هذا الغلاف بأي من مثبتات أو مكونات الإنشاء.



شكل ٦,١ طرق تركيب العازل الحراري وحاجز البخار لمخازن التبريد.

وتعرف الطريقة الأولى بطريقة الهيكل الإنشائي الخارجي، بينما تعرف الطريقة الثانية بطريقة الهيكل الإنشائي الداخلي. ويلاحظ أنه إذا ضم مخزن التبريد عـدة غرف تبريد تعمـل عـند درجات حـرارة مختلفة، فإنه يمكن في الطريقة الأولى (الهيكل الإنشائي الخارجي) تركيب العازل الحراري وحاجز البخار لكل غرفة بمفردها، أو لكل مجموعة غرف متساوية في درجات الحرارة. وتختلف هاتين الطريقتين بالطبع في المميزات والعيوب. فمن مميزات وضع العازل الحراري وحاجز البخار داخل الهيكل الإنشائي الآتي: سهولة نقل

ورص البضائع نظرًا لعدم وجود أي جزء من الهيكل الإنشائي داخل غرفة التبريد، وعدم تأثر العازل الحراري وحاجز البخار بالعوامل الخارجية للجو، مثل: أشعة الشمس، والرياح، والأمطار، والرطوبة، وغيرها، وتبريد الحمل الداخلي لغرفة التبريد فقط دون الحاجة لتبريد الهيكل الإنشائي أيضًا، واستخدام مساحة سطحية من العازل الحراري وحاجز البخار أقل من المساحة المستخدمة في الطريقة الثانية، وحماية حاجز البخار من الاختراق، وسهولة تثبيت الهيكل الإنشائي مع الأساس. أما أهم العيوب الخاصة باستخدام الهيكل الإنشائي الخارجي فهي تعرض الهيكل الإنشائي الخارجي لعوامل الجو الخارجية، مما يتطلب صيانة دائمة له، وتعرض الهيكل الإنشائي إلى التمدد أو الانكماش إذا كانت درجة الحرارة الخارجية تتغير بشكل محسوس، مما قد يؤدي إلى كسر الغلاف الخارجي لحاجز البخار والعازل الحراري ما لم يؤخذ هذا في الاعتبار أثناء التركيب، وصعوبة تركيب معدات التبريد مثل المبخر وأنابيب المبرد ونظام توزيع الهواء داخل غرفة التبريد [المعهد الدولي للتبريد، IIR 1993].

أيضًا هناك عدة مميزات عند استخدام هيكل إنشائي داخلي وتركيب عازل حراري وحاجز بخار خارجيين. وتتلخص هذه المميزات في الآتي: وجود الهيكل الإنشائي داخل غرفة التبريد، مما يعني ثبات درجة حرارته مع تغير درجة حرارة الجو الخارجي، وبالتالي عدم التعرض للتمدد والانكماش، وحماية الهيكل الإنشائي من التأثر بالعوامل الخارجية للجو، وبالتالي خفض تكلفة صيانته، وسهولة تركيب المبخر وأنابيب المبرد ونظم توزيع الهواء داخل غرف التبريد، وسهولة تركيب أرفف ثابتة أو متحركة داخل غرف التبريد دون الخوف من كسر العازل الحراري وحاجز البخار. أما أهم عيوب طريقة الهيكل الإنشائي الداخلي فتتخلص في الآتي: استخدام مساحة سطحية أكبر من العازل الحراري وحاجز بخار الماء مقارنة بالطريقة الأولى، وكبر الحجم المطلوب تبريده حيث

يضاف حجم الهيكل الإنشائي إلى حجم غرفة التبريد، وتعرض العازل الحراري وحاجز البخار للعوامل الجوية الخارجية مع زيادة احتمال اختراق الغلاف الخارجي لحاجز البخار، وصعوبة تركيب أي معدات أو مكونات إضافية من الخارج [IIR 1993].

٦,٣ مواصفات البناء

تعتمد مواصفات الحوائط الخارجية لمخازن التبريد على نوع الهيكل الإنشائي المستخدم للبناء أي إن كان هيكلا معدنيًا أم خرسانيًا، وكذلك على طريقة العزل الحراري المستخدم. ومن أهم المواد المستخدمة في الحوائط الخارجية ألواح الألمنيوم المموجة، وكذلك ألواح الصلب المطلية بالبلاستيك، وألواح الاسبستوس، والحوائط الخرسانية، والحوائط المبنية من الطوب وغيرها.

تُكسى أسطح الحوائط بالبلاستيك المقوي أو بالمعدن. ويجب أيضًا تركيب واقيات (سدابة) صدمات أسفل هذه الأسطح لحمايتها من التعرض لأي صدمات من معدات نقل البضائع. وتصنع هذه الواقيات من الخشب أو المعدن وتوضع فوق الأرضية مباشرة.

تصنع الطبقة العليا للأرضية من بلاطة من الأسمنت المسلح بسمك يتراوح بين ١٠ إلى ١٥سم تبعًا للأحمال المتوقعة على سطح الأرضية. ويفضل في الحالات التي قد تتعرض فيها الأرضية لتآكل شديد نتيجة حركة الأوناش عليها أن توضع طبقة من مادة مقاومة للتآكل على سطح بلاطة الأرضية لحمايتها من التآكل.

ويجب عند صب بلاطة الأرضية فوق العازل الحراري للأرضية، تغطية العازل الحراري جيدًا بالبلاستيك أو بشرائح البيوتين وضمان عدم إمكانية

تسرب الماء الموجود بالخرسانة المسلحة عند صبها إلى العازل الحراري والأرضية. كما يجب ضمان أن يكون السطح العلوي لبلاطة الأرضية أفقيًا تمامًا وأن يكون بالخشونة الكافية لمنع الانزلاق.

وقد يفضل في كثير من الأحيان عند استخدام بالات لتخزين البضائع مع عدم استخدام أرفف، وأن تخطط الأرضية بلون واضح (مثل اللون الأصفر عادة) لتوضيح أماكن وضع البالات وممران سير الأوناش داخل مخزن التبريد. ويجب أن يكون الطلاء المستخدم لوضع هذه العلامات من النوع الذي يصعب تآكله وإزالته من الأرضية.

وفي بعض مخازن التبريد، تستخدم بلاطات من الأسمنت المسلح سابقة التجهيز لهذا الغرض. عندئذ توضع فرشة من الرمل بسمك حوالي ٢سم فوق العازل الحراري وتوضع هذه البلاطات فوقها مباشرة. ومن الضروري تجنب استخدام أي بلاعات صرف في أرضيات مخازن التبريد خاصة في غرف التخزين التي تعمل عند درجات حرارة تحت الصفر المئوي. أما إذا كان من الضروري تركيب مثل هذه البلاعات في غرف التخزين التي تعمل عند درجات حرارة أعلى من الصفر المئوي، فيلزم أخذ الحيطة من عدم اختراق البالوعة أو المواسير المتصلة بها لحاجز البخار، كما يجب التأكد من وضع مانع تسرب الماء بدقة حول البالوعة لضمان عدم تسرب الماء إلى العازل الحراري.

تستخدم مخازن التبريد عدة أنواع من الأبواب أهمها: الأبواب الدوارة (أي التي تدور حول محور)، والأبواب المنزلقة أفقيا، والأبواب المنزلقة رأسيًا. وفي جميع هذه الأنواع يلزم عزل الأبواب حراريًا للحد من الحرارة المنقولة خلالها إلى داخل مخازن التبريد. وتستخدم الأبواب المنزلقة أفقيا بكثرة في غرف التبريد، بينما تستخدم الأبواب المنزلقة رأسيًا كأبواب اتصال مع عربات نقل

البضائع. وتعمل الأبواب المنزلقة أفقيًا أو رأسيًا يدويًا أو ميكانيكًا باستخدام قدرة كهربائية. وفي حالة استخدام القدرة الكهربائية لتشغيل أبواب مخازن التبريد، تستخدم مفاتيح كهربائية لفتح أو إغلاق هذه الأبواب، أو تفتح هذه الأبواب وتغلق أوتوماتيًا باستخدام حواس خاصة لذلك. ويفضل استخدام الطريقة الاوتوماتية لفتح الأبواب وإغلاقها عند استخدام الأوناش والسيور المتحركة لنقل البضائع من وإلى مخازن التبريد.

ويفضل دائمًا كسوة الأبواب بالبلاستيك أو رقائق المعدن لحمايتها، وقد تكون هذه الكسوة لمسطح الباب بالكامل أو للجزء السفلي منه. وتستخدم أيضا في بعض الأحيان الستائر الهوائية وشرائح البلاستيك مع الأبواب للتقليل من حمل التبريد الناتج عن الهواء المتسرب إلى غرف التبريد أثناء فتح الأبواب. ويفضل في الكثير من الأحيان وجود حيز مبرد يفصل بين غرفة التبريد والجو الخارجي، مما يكون له أكبر الأثر في خفض حمل التبريد للهواء المتسرب إلى داخل غرفة التبريد.

وتواجه أبواب غرف التبريد التي تعمل عند درجات حرارة تحت الصفر المئوي مشاكل تشغيل وصيانة تنتج عن تكون ثلج على الأجزاء المتحركة لهذه الأبواب وعلى إطار الباب. ويتكون هذا الثلج نتيجة تكثف بخار الماء الموجود بالهواء خارج غرفة التبريد. وللتغلب على هذه المشكلة يجب أن تمد هذه الأبواب بمصدر حراري يمنع تكون الثلج عليها، ويكون التسخين كهربائيًا عادة. وفي حالة تشغيل الأبواب بقدرة كهربائية لفتحها وإغلاقها يجب أيضًا تسخين المفاتيح الكهربائية وصناديق الكهرباء الخاصة بتشغيل الباب لمنع تكون الثلج عليها مما قد يعوق عمل هذه الأبواب.

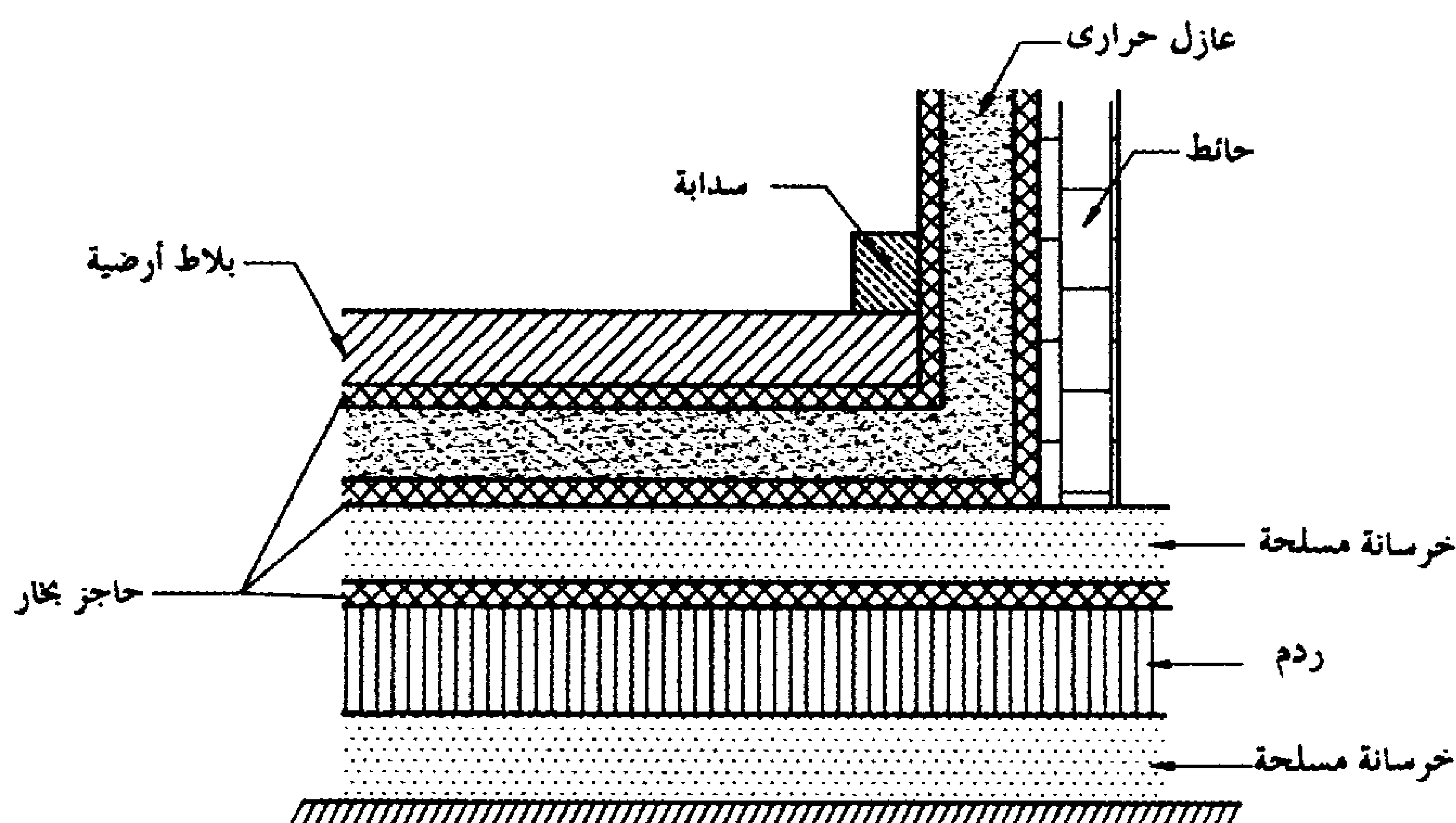
٦,٤ الأساس والأرضية

يصمم أساس مخازن التبريد لتحمل الأحمال الثابتة الناتجة عن الهيكل الإنشائي للمخزن بالإضافة إلى وزن البضائع المتوقع تخزينها، وأيضًا لتحمل الحمل المتحرك الناتج عن حركة أوناش نقل البضائع. ويؤخذ الحمل الثابت عادة فيما يتراوح بين ٥,٠٠٠ إلى ٨,٠٠٠ كجم/م^{٢} من أرضية مخزن التبريد، بينما يقدر الحمل المتحرك بحوالي ٣,٠٠٠ كجم لكل ونش أو ما يقدر بحوالي ١,٠٠٠ كجم لكل عجلة من عجلات الونش. وتعمل بلاطة أرضية مخزن التبريد على توزيع الحمل المتحرك بالتساوي على الأساس.

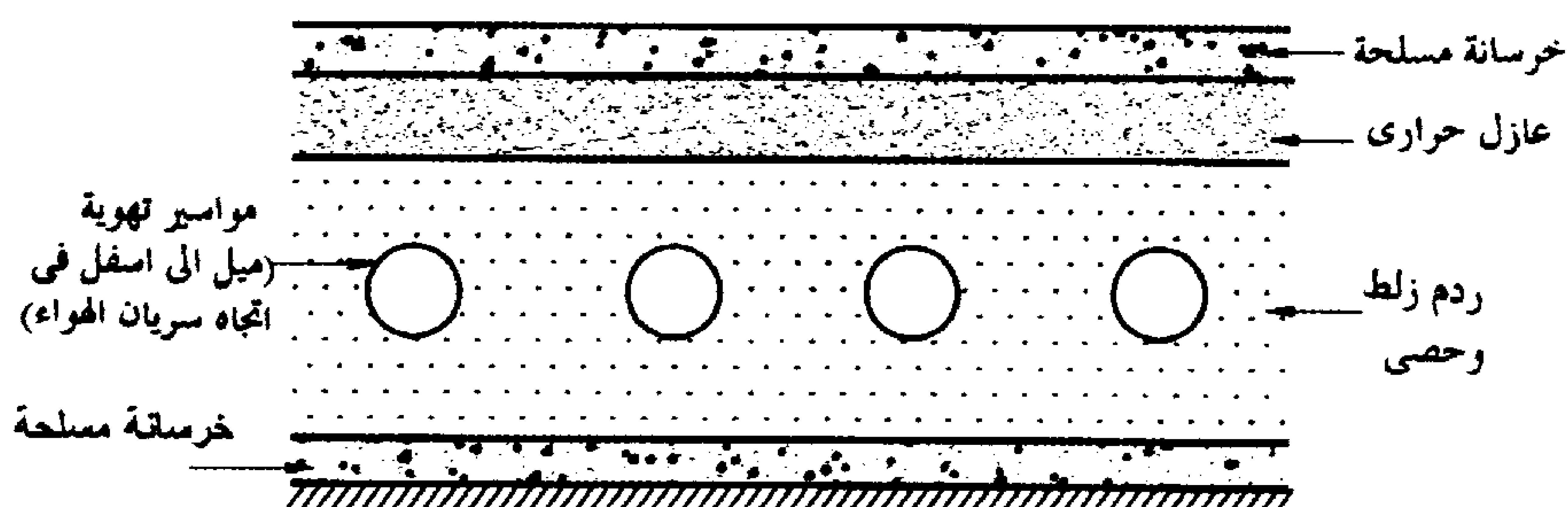
ويبين شكل ٦,٢ مكونات أرضية احد مخازن التبريد مع توضيح لتركيب العازل الحراري وحاجز البخار عند استخدام هيكل خارجي. لاحظ استخدام ثلاث طبقات من حاجز البخار لضمان منع تسرب بخار الماء إلى داخل مخزن التبريد.

ينتج عن تبريد مخزن التبريد، تبريد الأرض أسفل المخزن. فإذا كان المخزن يعمل عند درجات حرارة تحت الصفر المئوي، فإن ذلك يؤدي إلى انخفاض درجة الحرارة في بعض الأماكن بالتربة أسفل مخزن التبريد إلى ما دون الصفر المئوي أيضًا. وينتج عن ذلك تجمد المياه الموجودة بالتربة، وبالتالي تمددها، مما يسبب تصدع أساس وأرضية مخزن التبريد. وللتغلب على هذه المشكلة ينصح بتسخين التربة أسفل مخزن التبريد. ويتم ذلك بعدة طرق. مثلا، تصمم بعض مخازن التبريد بحيث تحمل أرضيتها فوق سطح الأرض على أعمدة، مع ترك سماح بين أرضية مخزن التبريد والأرض، مما يعمل على سريان الهواء الجوي أسفل مخزن التبريد. أيضًا، تعمل بعض التصميمات على وضع مواسير بردم من الحصى والزلط للسماح بمرور الهواء خلال الردم

(انظر شكل ٦,٣). ويراعى عند تركيب هذه المواسير أن تكون مائلة إلى أسفل في اتجاه سريان هواء التهوية، نظرًا لأن تبريد الهواء أثناء مروره أسفل مخزن التبريد يعمل على زيادة كثافته، وبالتالي هبوطه إلى أسفل.



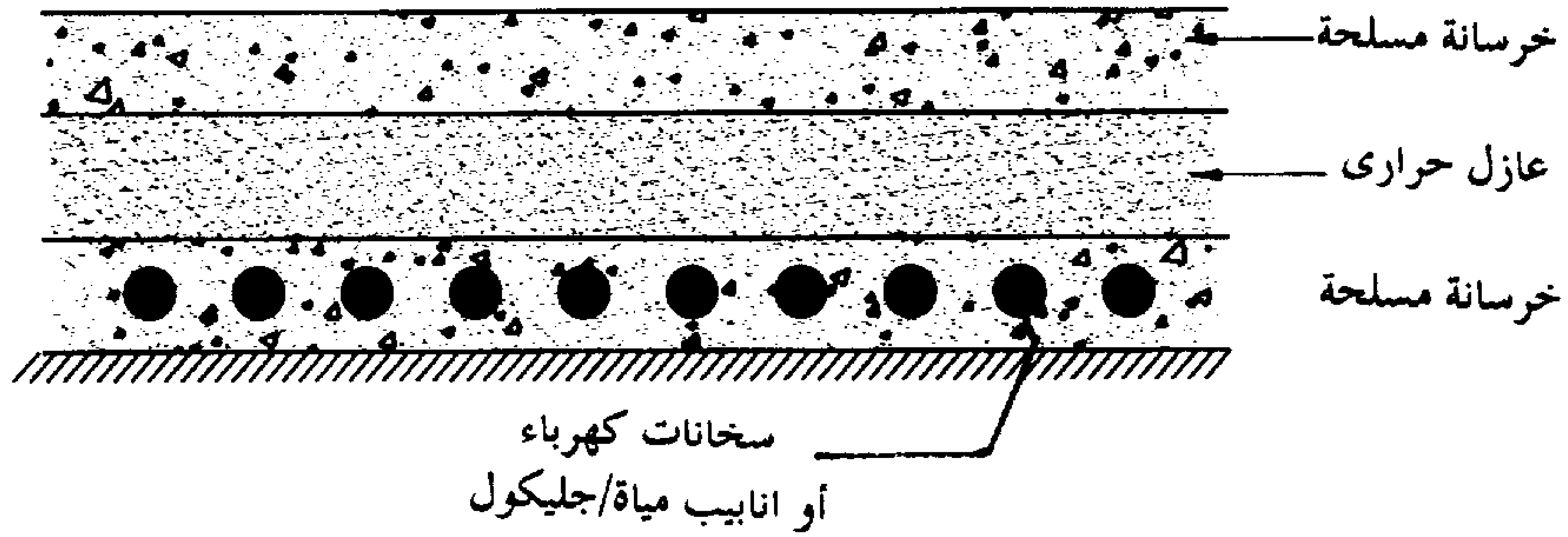
شكل ٦,٢ تركيب العازل وحاجز البخار (هيكل خارجي) لمخزن تبريد.



شكل ٦,٣ تركيب مواسير تهوية بأرضية مخزن التبريد للحماية من التصدع.

كما تتبع بعض التصميمات الأخرى تسخين التربة أسفل مخزن التبريد، ويتم ذلك إما بسخانات كهربائية مدفونة في طبقة الخرسانة المسلحة أسفل مخزن

التبريد، أو مواسير تحمل مياه ساخنة أو جليكول ساخن (انظر شكل ٦,٤). ويتم التحكم في هذه السخانات بثرموستاتات تعمل على ضمان أن تبقى درجة حرارة التربة أسفل مخزن التبريد أعلى من درجة حرارة التجمد بحوالي من ٥ إلى ٦°م. وتوفيرًا لطاقة التسخين يستفاد من الحرارة المطرودة من المكثف بنظام التبريد لتسخين المياه أو الجليكول لتسخين الأرض أسفل مخزن التبريد. وتستخدم في العادة مواسير بلاستيك بى.في.سي (PVC) لحمل الماء الساخن أو الجليكول الساخن. وتؤخذ أقطار هذه المواسير حوالي ¾ بوصة وتوضع على مسافات حوالي ٦٠سم من بعضها البعض [Koelet, 1992].



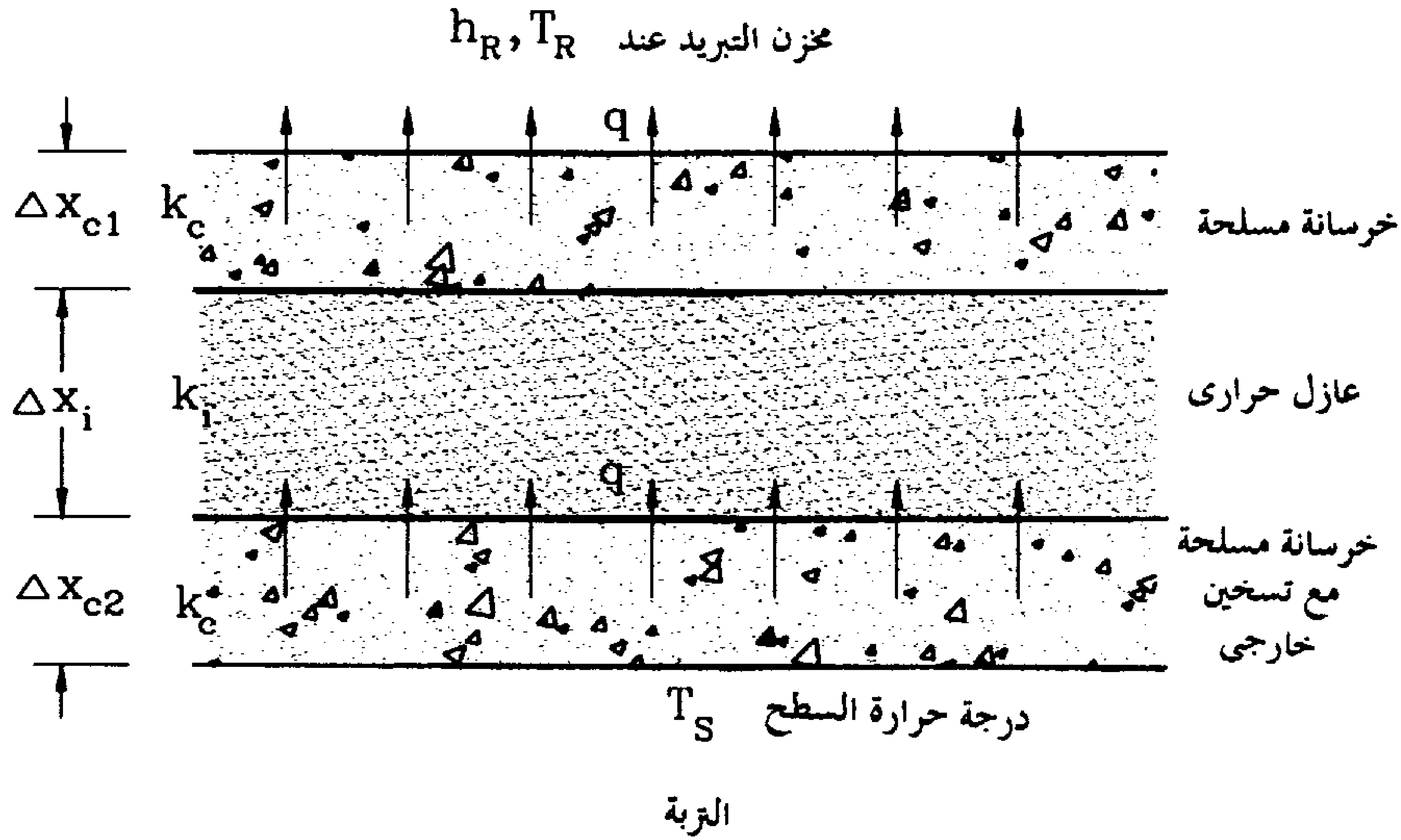
شكل ٦,٤ تسخين الأرضية لحمايتها من التصدع.

وللتعرف على معدل التسخين q اللازم لكل وحدة مساحات من الأرضية لحماية الأرضية من التصدع، يلزم أن ندرس أرضية مخزن التبريد المبينة بشكل ٦,٥. يعمل مخزن التبريد عند درجة حرارة قدرها T_R وهى أقل من الصفر المئوي، والمطلوب تسخين الطبقة السفلى عن الخرسانة المسلحة للمحافظة على درجة حرارة سطحها السفلي الملامس للتربة عند درجة الحرارة T_S. ويجب أن تكون هذه الدرجة أعلى من الصفر المئوي لمنع تجمد ماء التربة. تقدر الحرارة المنتقلة إلى مخزن التبريد عندئذ كما يلي :

$$q=U(T_s-T_R) \qquad (6.1)$$

حيث U هي المعامل الكلي لانتقال الحرارة بين السطح السفلي للخرسانة ومخزن التبريد. ويقدر هذا المعامل كما يلي

$$\frac{1}{U}=\frac{1}{h}+\frac{\Delta X_{c1}}{k_c}+\frac{\Delta X_i}{k_i}+\frac{\Delta X_{c2}}{k_c} \tag{6.2}$$



شكل ٦,٥ انتقال الحرارة إلى مخزن التبريد خلال الأرضية.

حيث k_c هي معامل التوصيل الحراري للأسمنت المسلح، و k_i هي معامل التوصيل الحراري للعازل الحراري و h هي معامل انتقال الحرارة بالحمل بين أرضية مخزن التبريد وهواء مخزن التبريد، و Δx_{c1} و Δx_{c2} و Δx_{c3} هي على التوالي سمك الطبقة العليا للخرسانة المسلحة، وسمك العازل الحراري، وسمك الطبقة السفلى للخرسانة المسلحة. ويقدر معامل انتقال الحرارة بالحمل من العلاقة المعملية الآتية:

$$h=2.8+3V \tag{6.3}$$

حيث h بوحدات وات/م^{٢}.°م، و V (م/ث) هي سرعة الهواء داخل مخزن التبريد. ونظرًا لأنه يمكن عمليًا إهمال المقاومة الحرارية لانتقال الحرارة بالحمل

الحراري في الهواء، وبالتوصيل في الأسمنت المسلح، مقارنة بانتقال الحرارة بالتوصيل في العازل الحراري، عندئذ يمكن حساب U كما يلي:

$$U \cong k_i / \Delta X_i \tag{6.4}$$

ويبين المثال التالي كيفية الاستفادة من العلاقات السابقة لحساب معدل تسخين الأرضية لمنع تصدع التربة.

مثال ٦,١

يعمل مخزن تبريد عند −٢٠°م. وتتكون أرضية المخزن من طبقتين من الأسمنت المسلح كل منهما بسمك ٢٠سم، بينهما عازل حراري بسمك ٣٠سم.

أ) احسب معدل التسخين اللازم لمنع تجمد التربة.

ب) احسب معدل التسخين اللازم لمنع تجمد التربة إذا أصبح سمك العازل الحراري ٦٠سم بدلا من ٣٠سم.

افرض البيانات الهندسية الآتية:

- معامل التوصيل الحراري للخرسانة المسلحة = ١,٥١٢ وات/م.°م
- معامل التوصيل الحراري للعازل الحراري = ٠,٠٣٧ وات/م.°م

الحل

أ) بفرض سرعة هواء قدرها ٢,٥ م/ث داخل مخزن التبريد، عندئذ يقدر معامل انتقال الحرارة h بين أرضية الغرفة والهواء كما يلي:

$$h = 2.8 + 3 \times 2.5 = 10.3 \ \mathrm{W/(m^2 . ^\circ C)}$$

ويقدر المعامل الكلي لانتقال الحرارة كما يلي:

$$\frac{1}{U}=\frac{1}{10.3}+\frac{0.2}{1.512}+\frac{0.3}{0.037}+\frac{0.2}{0.512}$$

$$U=0.118\ \ \mathrm{W/(m^2.^\circ C)}$$

وبفرض المحافظة على درجة حرارة السطح العلوي للتربة عند ٥ °م لمنع التجمد فإن:

$$q{=}0.118[5-(-20)]{=}2.95\ \ \mathrm{W/m^2}$$

وللأمان يؤخذ معدل تسخين قدره ٦ وات/م^{٢}.°م.

وباستخدام المعادلة التقريبية، يمكن تقدير قيمة U كما يلي:

$$U = k_i/\Delta X_i = 0.037/0.3$$

$$= 0.123\ \mathrm{W/(m^2.^\circ C)}$$

أي بخطأ أقل من ٥٪ في قيمة U، ويقل هذا الخطأ كلما زاد سمك العازل الحراري.

ب) بأخذ عازل حراري بسمك ٦٠سم، عندئذ تقدر U كما يلي:

$$U{=}0.037/0.6{=}0.0617\ \ \mathrm{W/(m^2\ ^\circ C)}$$

ويصبح معدل التسخين المطلوب كما يلي:

$$q{=}0.0617(5--20){=}1.5\ \ \ \mathrm{W/m^2}$$

وللأمان يؤخذ معدل التسخين حوالي ٣ وات/ م^{٢}.°م.

٦,٥ تخطيط مخازن التبريد

يختلف المخطط العام لمخازن التبريد من مخزن إلى آخر، حيث يعتمد هذا المخطط على العديد من العوامل، منها على سبيل المثال لا الحصر: الشكل الهندسي للأرض التي سينشئ عليها المخزن ومساحتها، وموقع هذه الأرض بالنسبة للشوارع المحيطة بها، وحجم ونوع المواد المطلوب تخزينها، وفترة التخزين، وطبيعة وموقع أرصفة التحميل والتفريغ بالنسبة للمخزن ...الخ. وبالطبع لا توجد طريقة معينة لوضع المخطط العام لمخازن التبريد، إلا أنه يمكن القول بأن هناك قواعد هندسية عامة يلزم أخذها في الاعتبار عند إعداد المخطط العام لمخازن التبريد. ويمكن تلخيص هذه القواعد في الآتي:

١. السماح بسهولة الحركة داخل مخزن التبريد. فمثلا يجب أن يكون عرض الممرات مناسبًا لحركة معدات نقل البضائع، وأن تكون أرصفة التحميل والتفريغ في أماكن لا تَؤدي إلى إعاقة الحركة داخل مخزن التبريد.

٢. أن توزع غرف التبريد بالمخزن تبعًا لدرجات حرارة التخزين بهذه الغرف، مما يساعد على خفض الحمل الحراري بالمخزن ويسهل تصميم نظام التبريد. فمثلا توضع غرف التبريد التي تعمل عند درجات حرارة أعلى من الصفر المئوي بالقرب من بعضها البعض، بينما توضع غرف التجميد، أي الغرف التي تعمل عند درجات حرارة تحت الصفر المئوي، بالقرب من بعضها البعض. ويساعد هذه على خفض الحمل الحراري الناتج عن التبادل الحراري بين الغرف من خلال الحوائط، وكذلك خفض الحمل الحراري الناتج عن تسرب الهواء من الممرات إلى داخل الغرف عند أبواب الغرف. وقد يفضل في بعض الأحيان أن تحاط غرف التبريد لدرجات الحرارة المنخفضة بغرف التبريد التي لها درجات حرارة أعلى نسبيًا مما يساعد على خفض حمل التبريد لهذه الغرف.

٣. إذا كان مخزن التبريد يحوي بعض العمليات الصناعية التي تسبق التخزين، يجب أن توضع هذه العمليات في موقع مناسب بالنسبة لغرف التخزين، بحيث تسهل الحركة بين عمليات التصنيع والتجهيز والتخزين.

٤. أن تكون غرفة الآلات والورشة في موقع لا يعوق التحميل والتفريغ.

أن يكون عدد الغرف بمخزن التبريد أقل ما يمكن. فمثلا تخزن جميع المواد التي تحتاج إلى حرارة تخزين متقاربة معًا إذا لم يصدر عن بعضها روائح مميزة قد تؤثر في المواد الأخرى المخزنة معها بنفس الغرفة.

ويوضح الشكلان ٦,٦ و ٦,٧ مخططين لمخزني تبريد. ويبين شكل ٦,٦ مخطط مخزن عام. لاحظ المميزات العامة الآتية في المخطط:

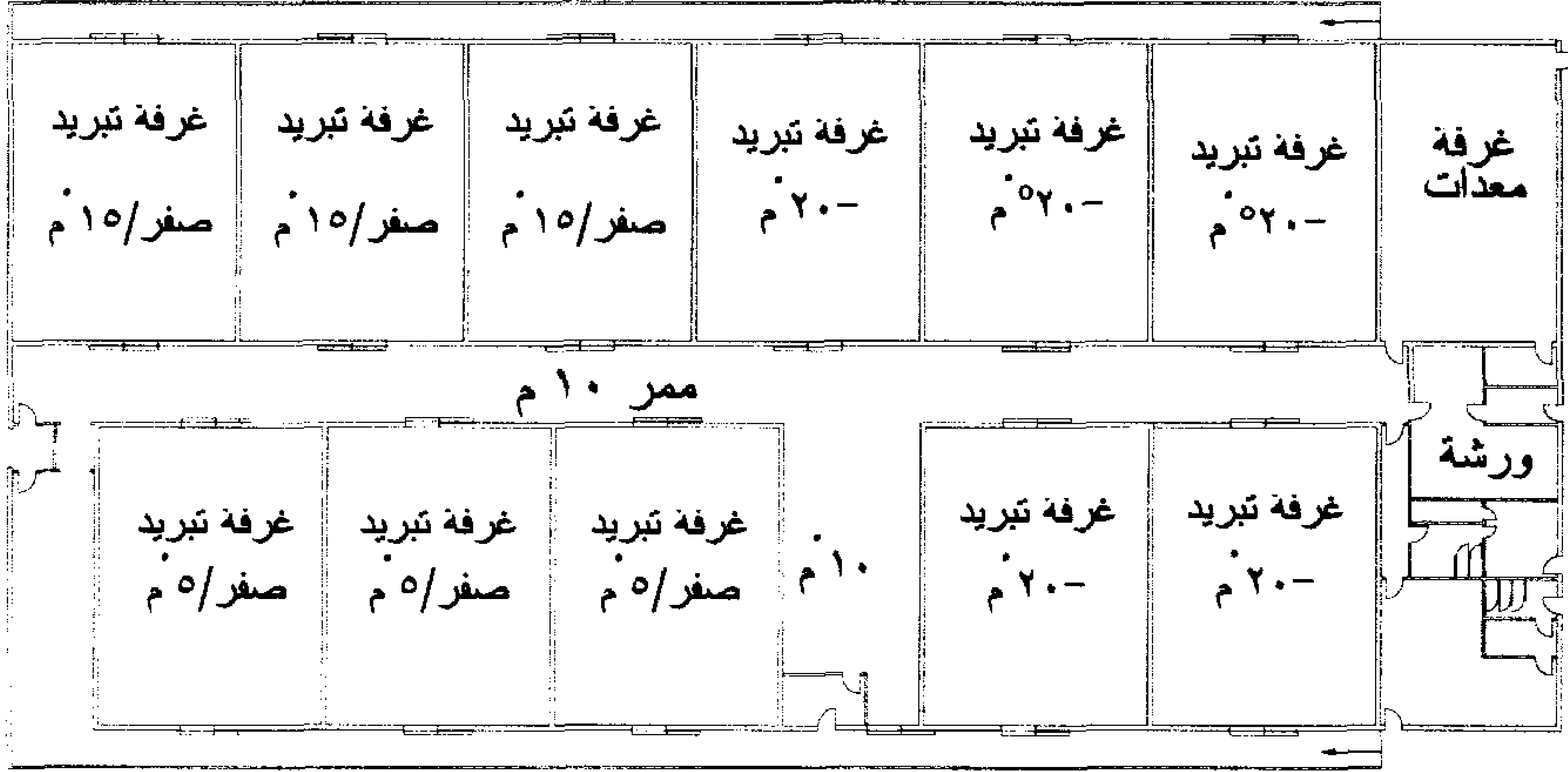
أ) وجود بابين لكل غرفة تبريد، باب على رصيف التحمل/ التفريغ وباب آخر على الممر الداخلي، مما يسهل عملية التفريغ والتحميل، ودون أن يؤثر العمل بأحد الغرف على تحميل/تفريغ غرفة أخرى.

ب) وجود رصيف تحميل/تفريغ لكل غرفة بمفردها.

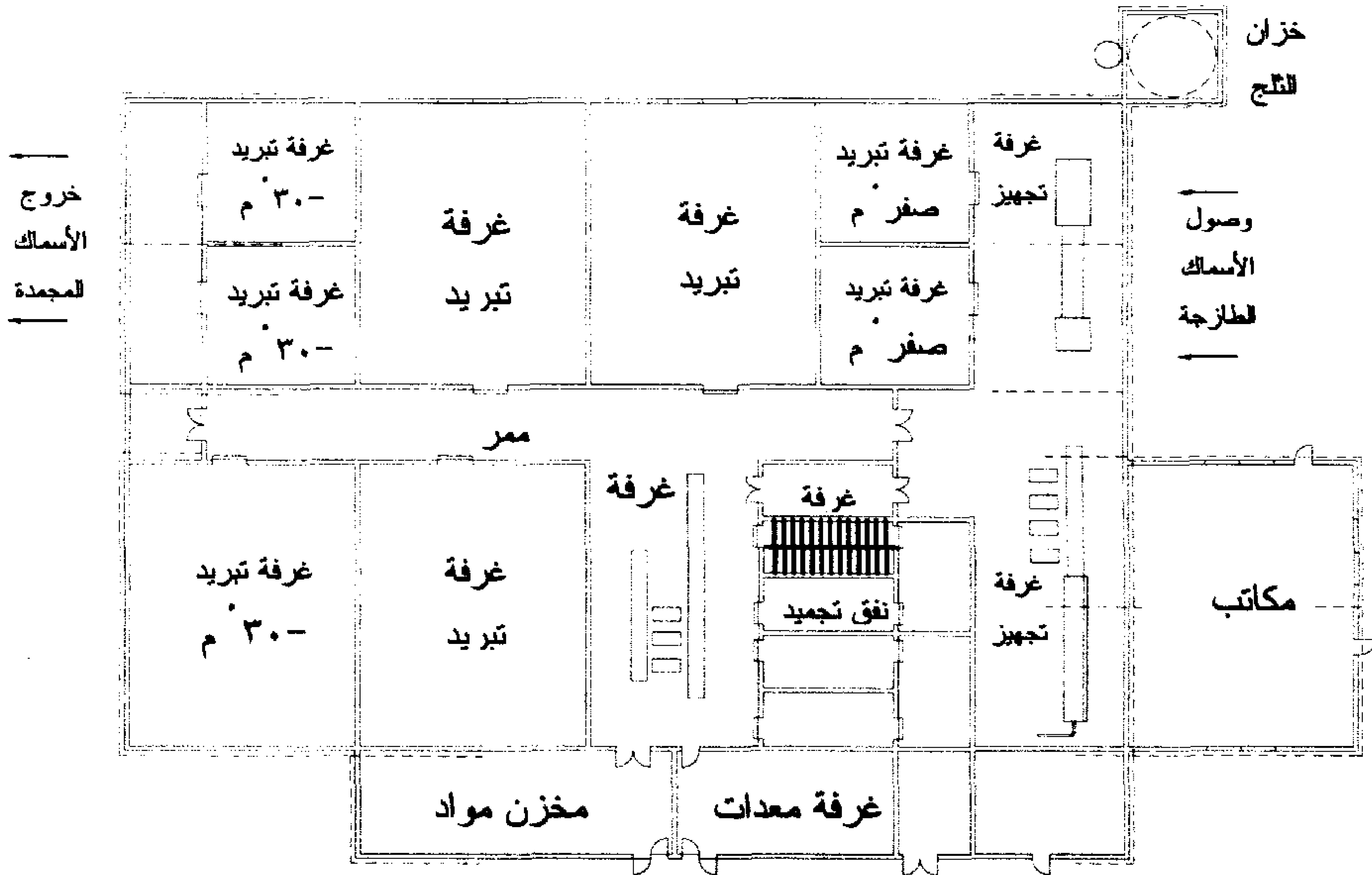
ج) وجود جميع غرف التبريد التي تعمل عند درجة حرارة فوق الصفر المئوي في الجانب الأيسر من المبنى، بينما توجد غرف التبريد التي تعمل عند درجة حرارة −٢٠ ^{o}م في الجانب الأيمن من المبنى، مما يساعد على خفض حمل التبريد بالغرف.

د) وجود غرف الخدمات (غرفة المعدات، والورشة، ومكاتب إدارة) في طرف مخزن التبريد، مما يسهل الوصول إلى هذه الغرف من الخارج، ودون المرور داخل مخزن التبريد. لاحظ أيضًا وجود الورشة بجانب غرفة المعدات لسهولة صيانة المعدات.

هـ) تماثل مساحات غرف التخزين، حيث إن المخزن يستخدم لتخزين منتجات منوعة (مخزن عام) دون التخصص في أحد المنتجات دون الآخر.



شكل ٦,٦ مسقط أفقي لمخزن عام.



شكل ٦,٧ مخزن لحفظ الأسماك المجمدة ملحق به خطوط تجهيز وتغليف الأسماك مع خطوط إنتاج الثلج.

ويبين شكل ٦,٧ أحد مخازن التبريد الخاصة بتخزين الأسماك والملحق بها خطوط تجهيز السمك وتعبئته قبل التخزين، وخطوط إنتاج الثلج. ونلاحظ بعد فحص المخطط المميزات التالية:

أ) وجود خطوط التجهيز والتعبئة في مواقع تسهل حركة المنتج في المراحل المختلفة للتجهيز والتعبئة ثم التخزين مباشرة، مع وجود مخزن التعبئة في الجانب الخلفي من مخزن التبريد ومتصل مباشرة بالمرحلة الأخيرة للتجهيز بعد أكمال عملية التجميد.

ب) وجود الإدارة في الجانب الأيمن من الخارج لسهولة التعامل مع المترددين على المخزن.

ج) دخول الأسماك الطازجة من الجانب الأيمن من المبنى وخروج الأسماك المجمدة المخزونة من الجانب الأيسر للمبنى، ويعني ذلك حركة المنتجات من اليمين إلى اليسار، مما يسهل الحركة داخل المخزن.

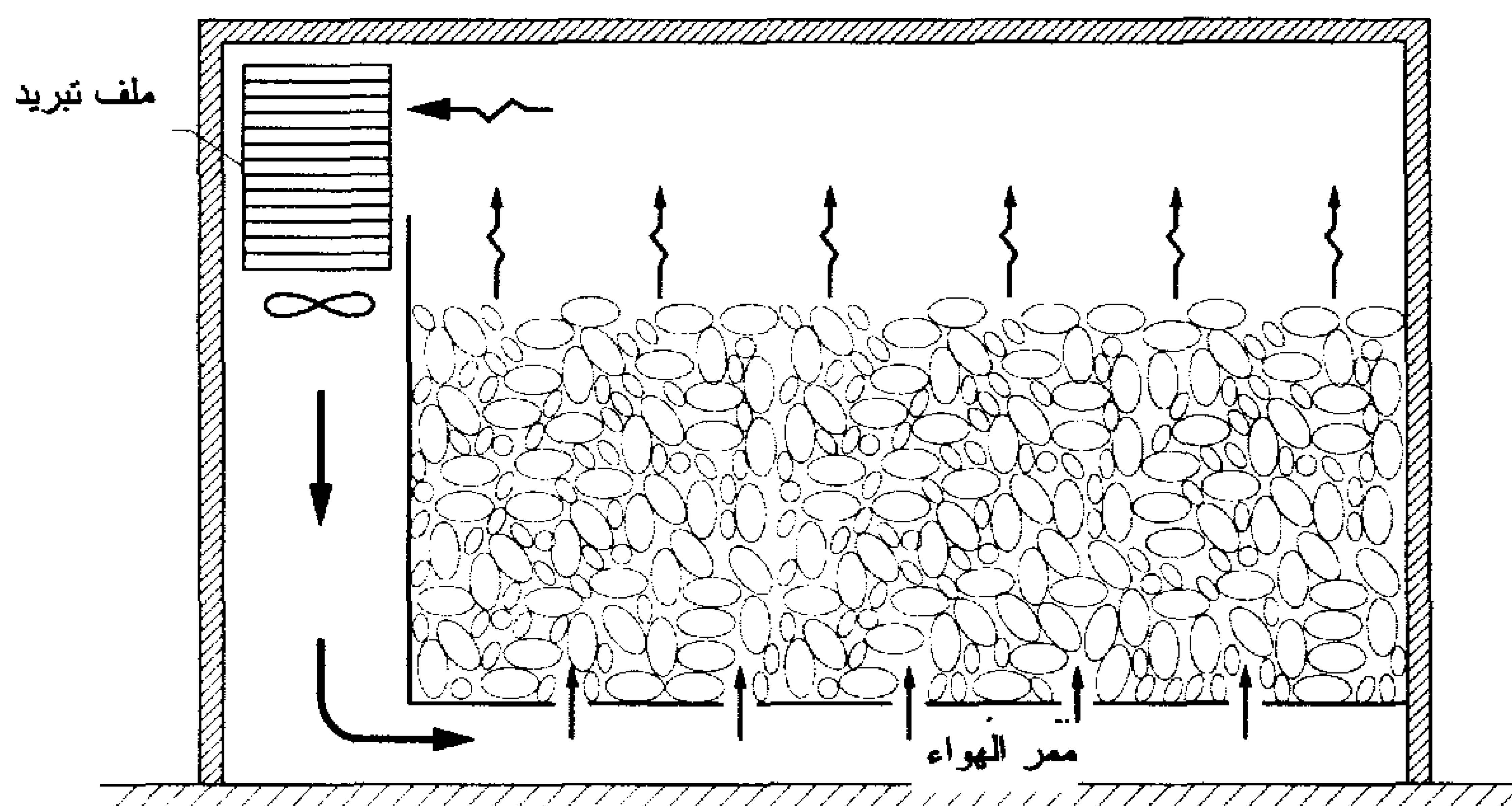
د) وجود غرف التبريد لحفظ الأسماك لحين تجهيزها في الطرف الأيمن من المبنى بجوار خطوط التجهيز.

من المثالين السابقين يتضح جليًا أن المخطط العام لأي مخزن تبريد يختلف من مخزن إلى آخر. وأن إعداد هذا المخطط يعتمد على عدة عوامل كما قدمنا سابقًا.

٦,٦ طرق الرص ونقل البضائع داخل مخازن التبريد

هناك عدة طرق لرص البضائع داخل غرفة التبريد. أول هذه الطرق هو وضع المواد المخزنة في أكوام، كما هو الحال في تخزين البطاطس والبصل على سبيل المثال. ويتطلب هذا النوع من التخزين طريقة خاصة لتوزيع الهواء.

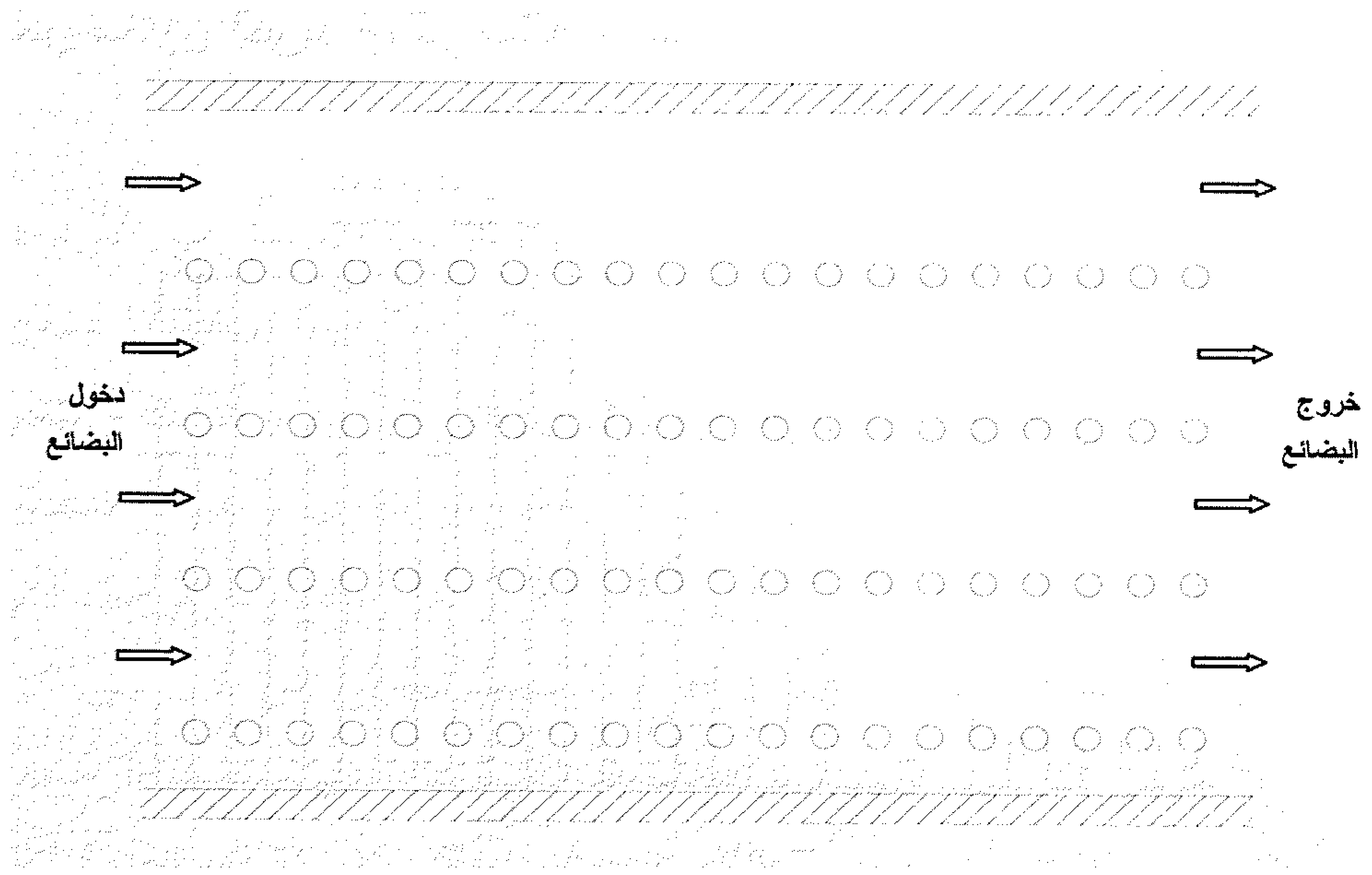
فيمرر الهواء من فتحات في أرضية غرفة التبريد متجهًا إلى أعلى مارًا بكومة المواد المخزنة، حيث يعود مرة أخرى إلى ملف التبريد (انظر شكل ٦,٨). ولا ينصح في هذه الحالة أن يزيد ارتفاع الكومة عن حوالي ٢ مترًا ويكون حجم التخزين حوالي ٦٠٠ كجم/م^{٣}. وتستخدم معدات خاصة وسيور نقل لوضع المواد المخزنة في غرف التبريد واسترجاعها مرة أخرى [Sabro1998]. وبالطبع ليست هذه هي الطريقة الوحيدة لتخزين البطاطس والبصل وإنما هناك طرق أخرى أيضًا.



شكل ٦,٨ توزيع الهواء في بطاطس مخزنة في أكوام.

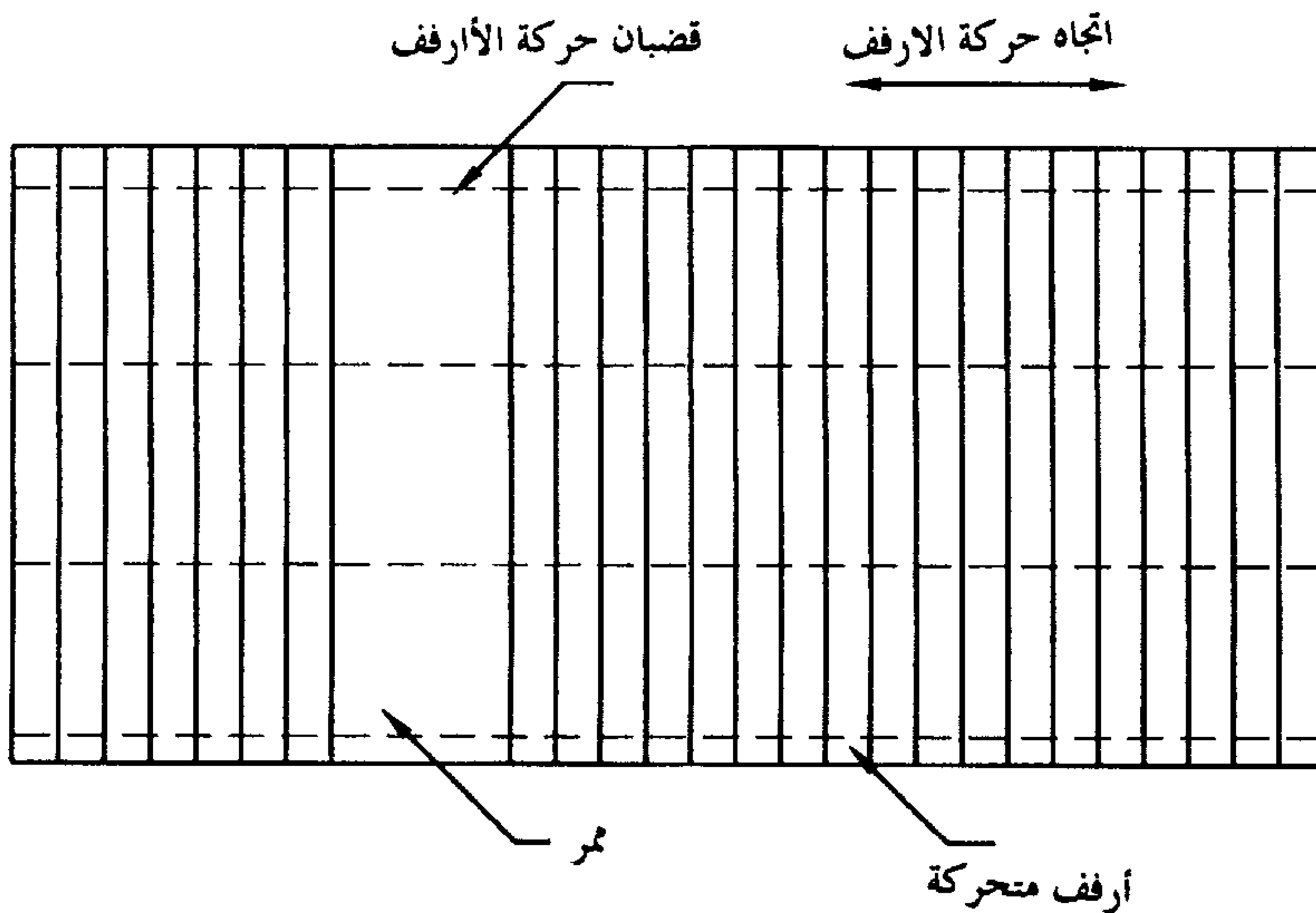
ثاني هذه الطرق هي وضع البضائع فوق بعضها البعض في رّصات. وبالطبع هناك حد أقصى لعدد الوحدات التي يمكن وضعها رأسيًا في كل رصة. ويعتمد هذا العدد على كيفية تعبئة المنتجات: أي إن كانت في أكياس أو صناديق خشب. أيضًا يمكن استخدام البالات (وهي فرش خشبية أو معدنية أو بلاستك لتحميل البضائع) لرص البضائع، ثم توضع البالات فوق بعضها البعض. عندئذ يلزم استخدام ونش شوكة لحمل البالات أثناء التفريغ والتحميل، مقارنة بالحالة الأولى التي يكتفي فيها بالتحميل والتفريغ يدويًا. ويؤخذ عادة المقاس القياسي لهذه البالات، وهو حوالي ١,٢م × ٠,٨٥م. ويتراوح عدد صفوف الرّصات من ٣ إلى ٨ رصات عند كل جهة من جهات أي ممر داخل غرفة التبريد.

في الطريقة الثالثة، تستخدم أرفف لرص البضائع. ويوجد نوعان من الأرفف: النوع الثابت والنوع المتحرك. وتستخدم الأرفف الثابتة بكثرة في مخازن التبريد. ويصمم هذا النوع بنموذجين. في النموذج الأول، يسمح بحركة الأوناش في ممرات بين هذه الأرفف لتحميل أو تفريغ البضائع، لذلك يجب أن يكون عرض الممر كافيًا لحركة الأوناش خلاله. في النموذج الثاني، لا يترك أي ممرات بين الأرفف، لذلك تحمل البضائع فوق الأرفف من جهة واحدة فقط وتفرغ البضائع من الجهة الأخرى للرف (انظر شكل ٦,٩). لذلك يلزم حينئذ رص البضائع في غرفة التبريد فيما يعرف بطريقة "ما يوضع أولا يؤخذ أولا" وذلك لضمان عدم ترك بعض البضائع لفترات طويلة داخل غرفة التبريد، مما قد يعرضها للتلف. ولسهولة تحميل البضائع وتفريغها من الأرفف الثابتة، تصمم هذه الأرفف من أسطوانات تدحرج لسهولة حركة البضائع فوق الأرفف من جهة إلى أخرى.

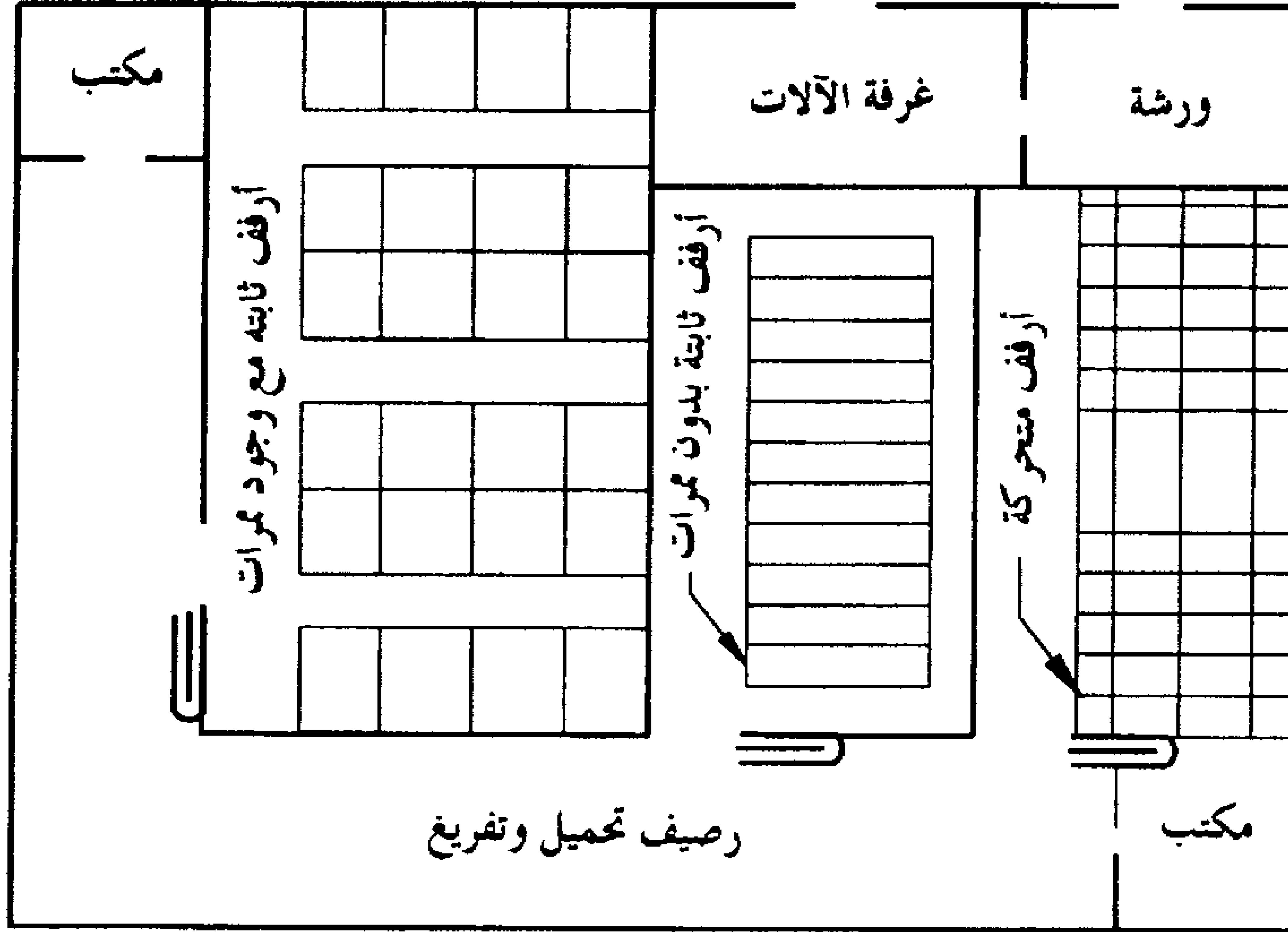


شكل ٦,٩ قطاع رأسي في أرفف ثابتة لرص البضائع مع توضيح لدخول وخروج البضائع من و إلى الأرفف.

تعرف الأرفف المتحركة بأنها مجموعة من الأرفف فوق حوامل، وتتحرك هذه الحوامل على قضبان مثبتة على الأرض، مما يسمح دائما بوجود ممر واحد فقط بين هذه الحوامل (انظر شكل ٦,١٠). وتمتاز الأرفف المتحرك بالاستفادة القصوى من حجم غرفة التبريد لتخزين البضائع. ويلزم عند استخدام هذا النوع من الأرفف وجود أجهزة التحكم الخاصة بالأمان التي تمنع تحرك هذه الأرفف إلا من طرف الممر للتأكد من عدم وجود أي أشخاص أو معدات داخل الممر. ويوضح شكل ٦,١١ استخدام الثلاثة أنواع السابقة من الأرفف في أحد مخازن التبريد. تنقل البضائع داخل مخازن التبريد بواحدة أو أكثر من الطرق الآتية : يدويًا، أو استخدام أوناش شوكة، أو استخدام سيور نقل الحركة. ويعتمد استخدام أي من هذه الطرق الثلاثة على نوع وحجم ووزن البضائع المنقولة داخل مخازن التبريد، وكذلك على حجم مخزن التبريد نفسه. أيضا تستخدم بعض مخازن التبريد أوناش معلقة بالسقف بكابينة متحركة.



شكل ٦,١٠ مسقط أفقي للأرفف المتحركة لرص البضائع.

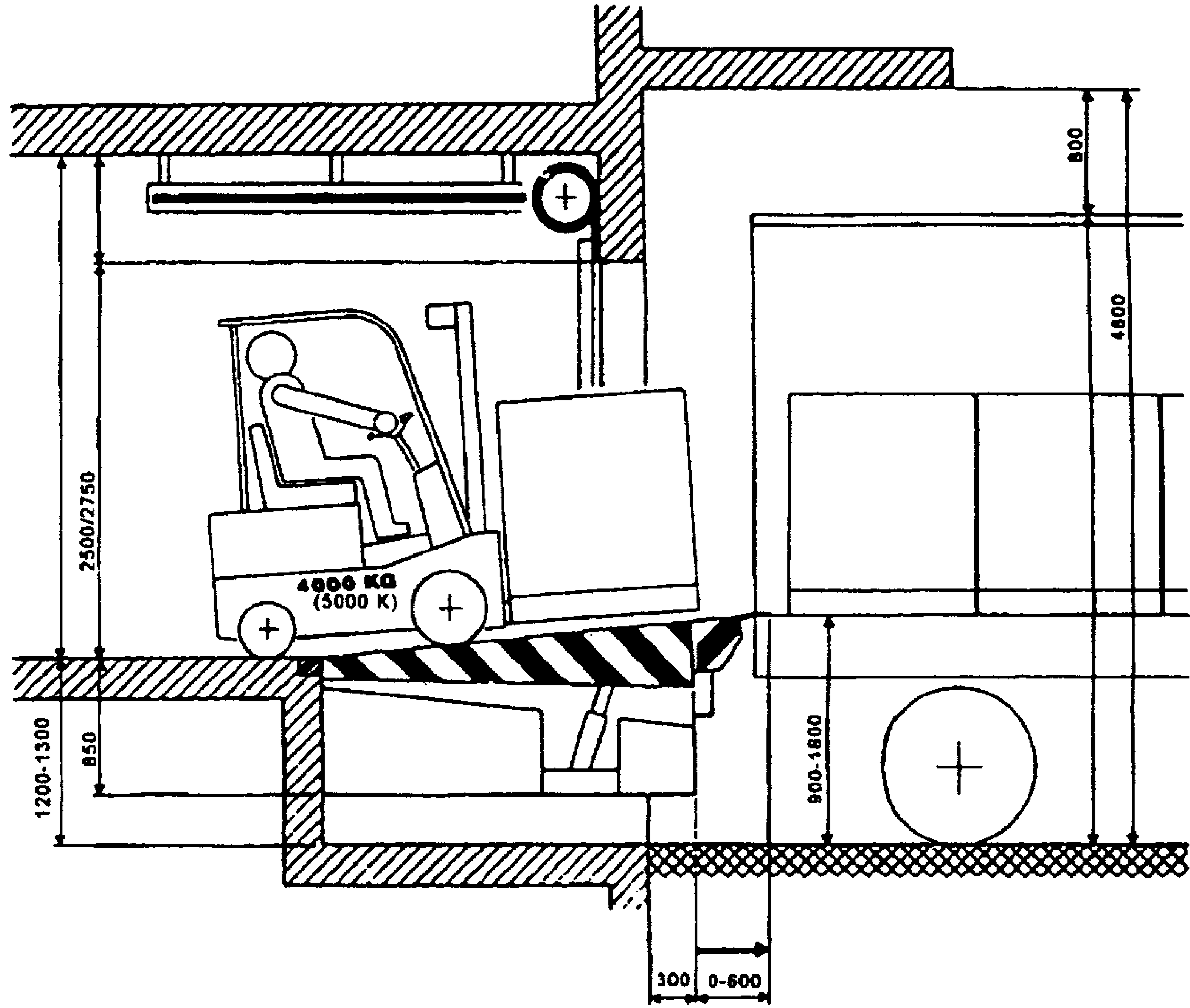


شكل ٦,١١ مسقط أفقي لمخزن تبريد به ثلاثة أنواع من أرفف رص البضائع.

٦,٧ أرصفة التحميل والتفريغ

تحتاج مخازن التبريد إلى أرصفة تحميل وتفريغ. وتصمم هذه الأرصفة بحيث تسمح بسهولة تحميل وتفريغ عربات النقل بأنواعها المختلفة. ونظرًا لاختلاف ارتفاع عربات النقل تبعًا لنوعها، وكذلك تغير هذا الارتفاع بتغير حمولة العربة، يجب وجود معدات خاصة لمساواة مستوى رصيف التحميل والتفريغ بمستوى عربات النقل. ويبين شكل ٦,١٢ أحد منحدرات الوصل التي تعمل لهذا الغرض. وعمومًا يؤخذ ارتفاع الرصيف حوالي من ١,٢ إلى ١,٣ مترا مقاسًا من الأرض. ويحدد ارتفاع سقف الرصيف عن مستوى الرصيف تبعا لأقصى ارتفاع مسموح به للبضائع المنقولة بأوناش الشوكة المستخدمة لنقل البضائع داخل مخزن التبريد. ويعتمد عرض رصيف التحميل والتفريغ على معدل التحميل والتفريغ المتوقع من الرصيف. ويحدد عدد الأبواب الموجودة في كل رصيف عدد عربات النقل المتوقع وجودها على الرصيف في نفس الوقت.

وبالطبع يعتمد عدد العربات على الحد الأقصى المتوقع للتحميل والتفريغ من الرصيف. ويفضل في المناطق الحارة أن يفصل رصيف التحميل والتفريغ عن غرف التبريد بغرفة بينية أو ممر. وتكون درجة حرارة هذه الغرفة البينية أو الممر بين درجة حرارة غرفة التبريد والجو الخارجي. وتستخدم الغرفة البينية أو الممر لحفظ البضائع لحين تحميلها إلى عربات النقل أو لحين تخزينها في غرفة التبريد بعد تفريغ عربات النقل.



شكل ٦،١٢ منحدر وصل لضبط مستوى الرصيف مع مستوى عربة النقل [IIR 1993] .

وتقسم أرصفة التحميل والتفريغ إلى أرصفة مستقيمة وأخرى مدرجة. ويبين شكل ٦،١٣ أحد الأرصفة المستقيمة، حيث x هي المسافة بين أماكن وقوف عربات النقل عند الأبواب المختلفة على الرصيف. ويجب ألا تقل هذه

المسافة عن ٤ متر لضمان عدم احتكاك العربات مع بعضها البعض. ويمثل الطول A طول عربة النقل. ويبين شكل ٦,١٤ رصيف مدرج للتحميل والتفريغ. لاحظ أيضًا أن المسافة بين أبواب الرصيف يجب ألا تقل عن ٤ متر كما بينا سابقًا. وتعتمد المسافة D المبينة بالشكل على زاوية الميل α والمسافة x ، وتقدر المسافة D كما يلي:

$$D = x / \sin \alpha \qquad (6.5)$$

وتعتمد المسافة B اللازمة لوقوف عربات النقل على أقصى طول A لعربات النقل وعلى المسافة x وزاوية الميل α كما يلي:

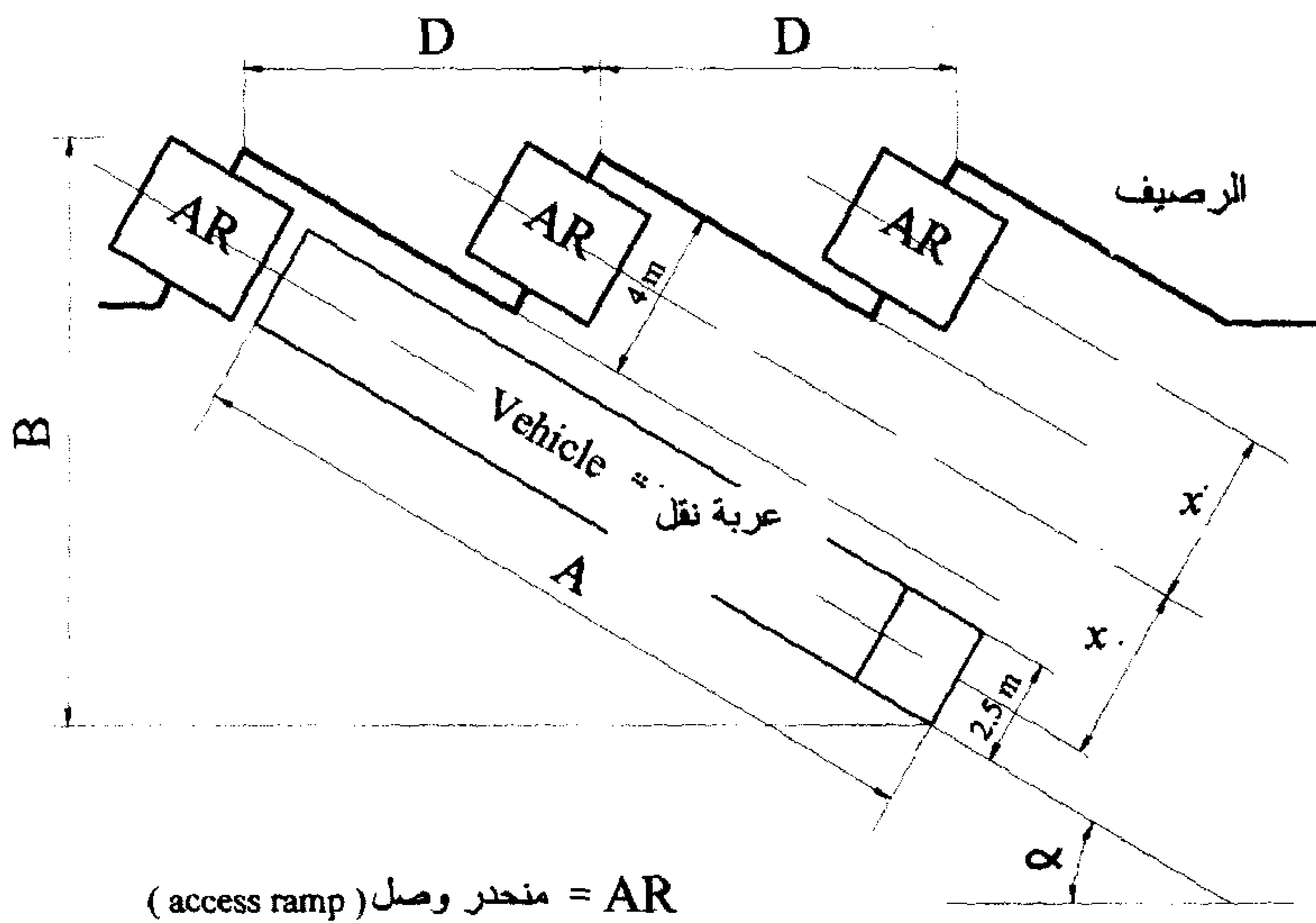
$$B = x \cos \alpha + A \sin \alpha \qquad (6.6)$$

وتقسم أرصفة التحميل أيضا إلى أرصفة مغلقة وأخرى مفتوحة. وتستخدم الأرصفة المغلقة في الأجواء مرتفعة درجة الحرارة، وعندما تكون البضائع المخزنة تحت درجة التجمد. ويلزم عند استخدام هذه الأرصفة وجود وسائل كافية لضمان عدم تسرب الهواء الخارجي إلى الرصيف. ويبين شكل ٦,١٥ استخدام وسائد منع تسرب الهواء حول عربات النقل أثناء وقوفها للتحميل أو التفريغ على الرصيف.

٦,٨ تقدير حجم غرف التبريد

يعتمد حجم غرفة التبريد على أربعة عناصر. أول هذه العناصر هي حجم البضائع المتوقع تخزينها بالغرفة. ويعتمد هذا الحجم على نوعية البضائع وطريقة تعبئتها. ويمكن لتقدير هذا الحجم الرجوع إلى الجداول المعطاة في الفصل الخامس من هذا الكتاب. ثاني هذه العناصر هو طريقة رص البضائع بالغرفة. فمثلا إن كانت ستســتخدم البالات الخاصة بنقل البضائع في عملية

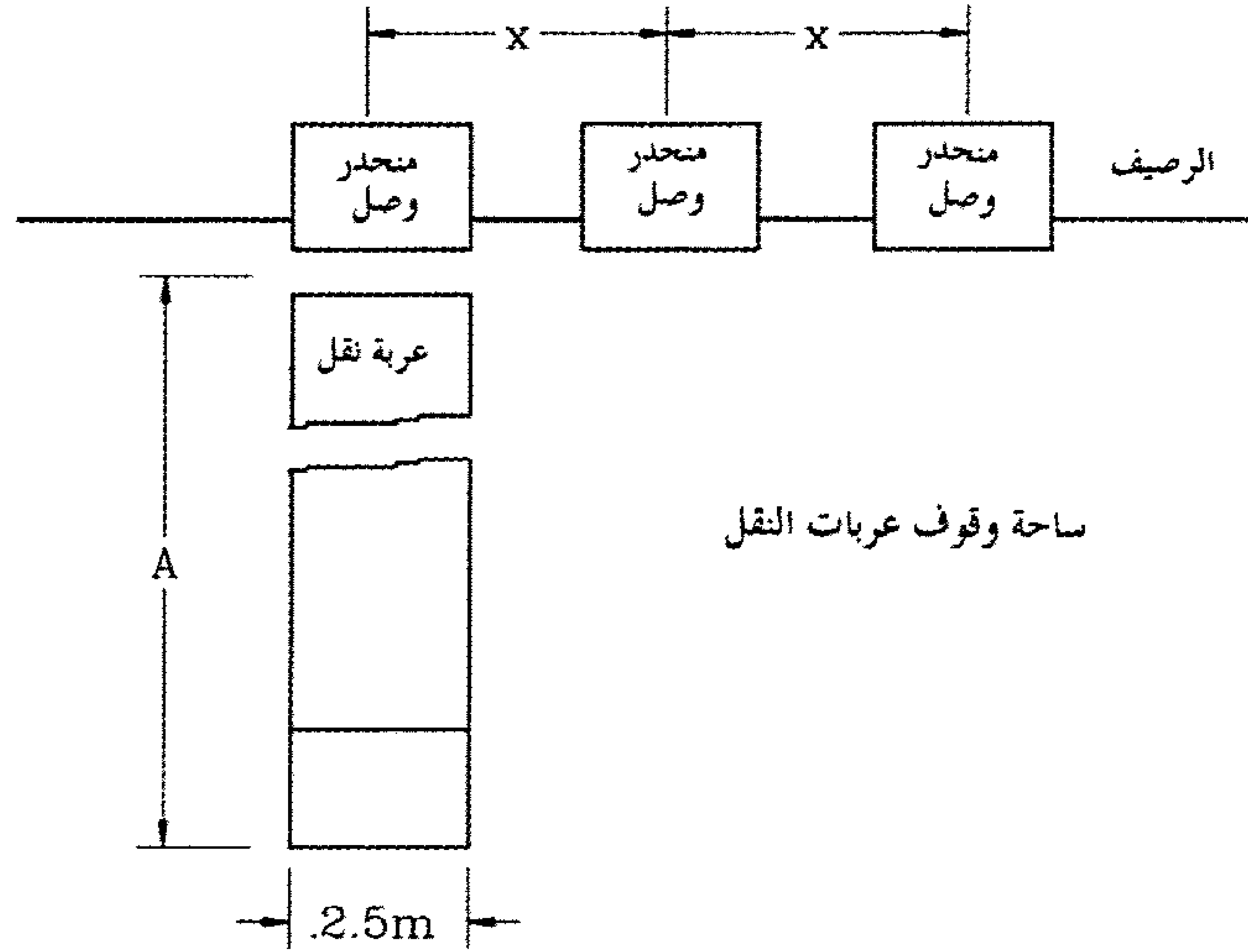
الرص أم لا، وعدد الرصات المتوقع وضعها فوق بعضها البعض، وإن كان الرص سيكون في أرفف ثابتة أو أرفف متحركة أو بدون أرفف على الإطلاق. أيضًا، يعتمد حجم الغرفة على عنصر ثالث وهو عرض الممرات اللازمة للتحميل والتفريغ. ويعتمد عرض هذه الممرات على نوع المعدات المستخدمة لذلك. فمثلا إذا كان من المتوقع استخدام ونش شوكة داخل غرفة التبريد، كان عرض أي ممر داخل الغرفة يتراوح بيّن ١,٤ إلى ٣,٨م تبعًا لنوع الونش المستخدم حيث تحتاج الأنواع الحديثة من هذه الأوناش عرض قدره ١,٤ مترًا فقط للحركة دون الحاجة للدوران للخلف خلال الممرات.



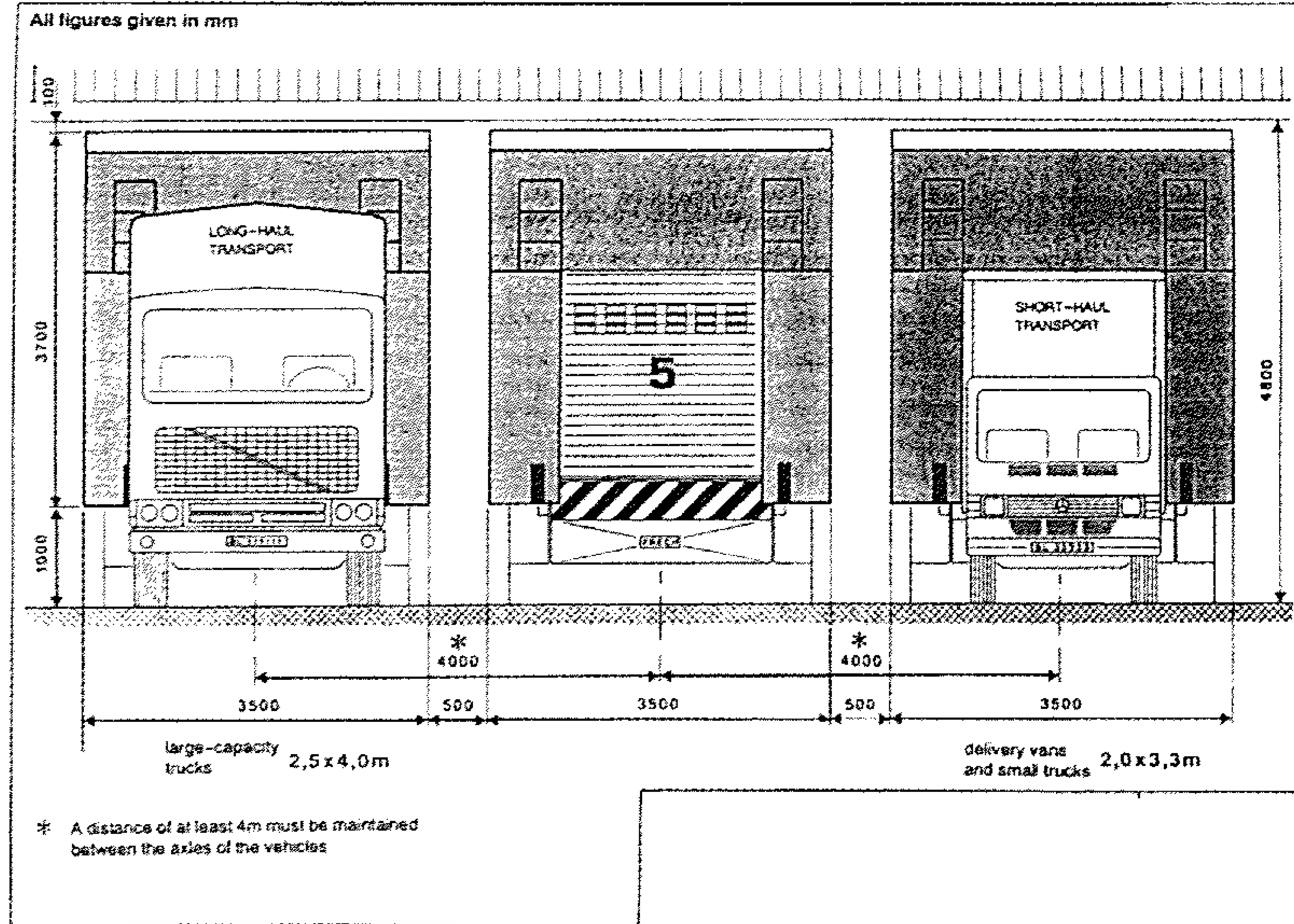
شكل ٦,١٣ رصيف مستقيم للتحميل والتفريغ.

أما العنصر الرابع الذي يؤثر في تقدير حجم غرفة التبريد فهو توزيع الهواء بغرفة التبريد، والحجم اللازم للمعدات الخاصة بذلك. وتوضع مبردات الهواء داخل غرفة التبريد على الأرضية أو أعلى الحائط. وهناك ثلاث طرق متبعة لتوزيع الهواء داخل غرفة التبريد. أول هذه الطرق هو استخدام مراوح

لها رمية كبيرة تكفي لوصول الهواء البارد إلى طرف غرفة التبريد في الجهة المواجهة لهذه المراوح. ثاني هذه الطرق هو استخدام ممرات لحمل الهواء إلى



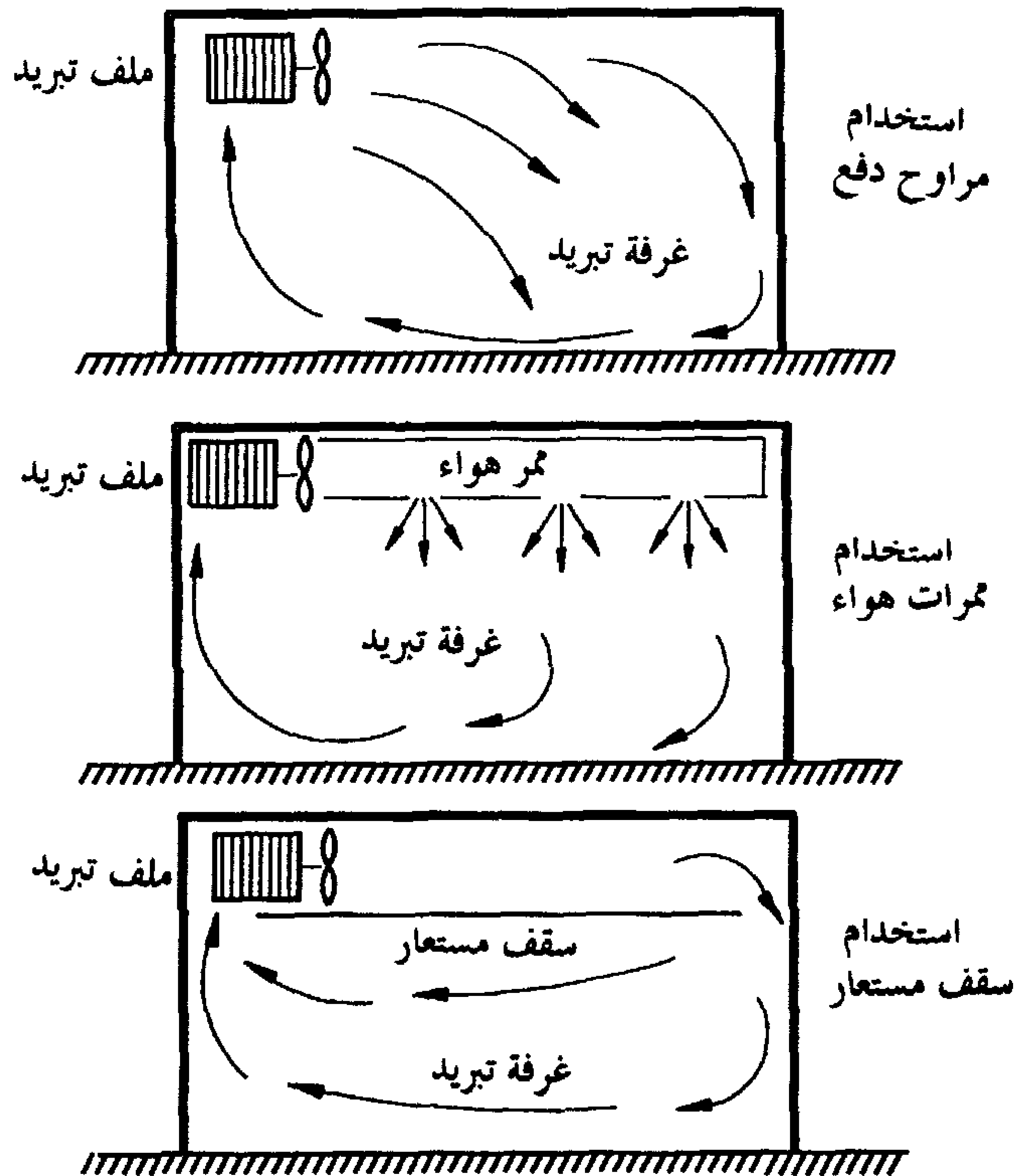
شكل ٦,١٤ رصيف مدرج للتحميل والتفريغ.



شكل ٦,١٥ استخدام وسائد عزل لمنع تسرب الهواء الخارجي إلى الرصيف عندما يكون الرصيف من النوع المغلق.[IIR 1993].

جميع الأماكن بغرفة التبريد لضمان توزيعًا جيدًا للهواء داخل غرفة التبريد. أما الطريقة الثالثة فتستخدم سقفا صناعيًا يوضع فوقه ملف تبريد الهواء، حيث يسرى الهواء البارد فوق هذا السقف إلى طرف غرفة التبريد ثم إلي غرفة التبريد، ثم يمر خلالها إلى طرفها الآخر، ويعود مرة أخرى إلى ملف التبريد (انظر شكل ٦,١٦).

ويوجد بالطبع بعض القيم التقريبية التي تستخدم لتقدير حجم مخازن التبريد تبعًا لكتلة البضائع المتوقع تخزينها. ولقد تم إعداد هذه القيم التقريبية من الخبرات العملية السابقة في تشغيل مخازن التبريد. ويبين جدول ٦,١ بعضًا من هذه القيم [Koelet, 1992].



شكل ٦,١٦ طرق توزيع الهواء بغرف التبريد.

جدول ٦,١ قيم تقريبية لسعة التخزين لأنواع مختلفة من مخازن التبريد.

طن/١٠٠٠م²	التوصيف
٢٠٠	مخزن تبريد للاستخدام العادي، ٣ بالات بكل رصة بارتفاع حوالي ٤,٥ إلى ٥ أمتار لكل رصة
١٦٠	تخزين منتجات مثلجة فقط
٣٠٠	تخزين منتجات مجمدة فقط
٢٢٥	مخزن تبريد لتخزين التفاح والكمثرى بارتفاع من ٦ إلى ٧ أمتار

٦,٩ خفض درجة حرارة غرف التبريد

يلزم عند تشغيل مخزن التبريد لأول مرة اتباع خطوات هندسية معينة لخفض درجة الحرارة داخل غرف التبريد إلى المستوى المحدد لها. ويعزى هذا إلى انكماش عناصر الهيكل الإنشائي لغرف التبريد بمقادير أكبر من تلك للعناصر الإنشائية الأخرى الموجودة خارج الغرف. لهذا السبب يجب على المصمم الإنشائي لمخازن التبريد مراعاة الحيطة عند التصميم ووضع وصلات تسمح باختلاف مقادير الانكماش لعناصر التصميم داخل وخارج غرف التبريد.

يتم خفض درجة الحرارة ببطء داخل غرف التبريد. فإذا كانت هذه الغرف تعمل عند درجات حرارة تحت الصفر المئوي، لزم خفض درجة الحرارة على مرحلتين. في المرحلة الأولى تخفض درجة الحرارة حتى تصل إلى ٢°م، ثم تحفظ الغرفة حوالي يومين أو ثلاثة أو أكثر عند هذه الدرجة حتى يتم التأكد من جفاف الغرفة وكذلك التأكد من خفض الرطوبة بها عن طريق مراقبة معدل تكثف بخار الماء على ملف التبريد بالغرفة. وعند ضمان استقرار درجة حرارة غرفة التبريد عند ٢°م واستقرار نسبة الرطوبة بها، تملأ جميع الفراغات الناتجة

عن انكماش عناصر الإنشاء المختلفة بمانع تسرب بخار الماء إلى الغرفة. تستمر بعدئذ عملية خفض درجة حرارة غرفة التبريد ببطء بمعدل يصل إلى حوالي ٦°م يوميًا حتى تصل درجة حرارة الغرفة إلى القيمة المطلوبة.

٦,١٠ تغير الضغط في مخازن التبريد

تصمم مخازن التبريد لتكون محكمة الغلق. ويهدف هذا إلى الحد من تسرب الهواء الخارجي إلى مخزن التبريد، وبالتالي تخفيض حمل التبريد، ومنع دخول الماء إلى داخل المخزن. وينتج عن ذلك – أي الإغلاق المحكم – احتمال تغير الضغط داخل الغرفة عن خارجها، مما قد يسبب تلف الحوائط والوصلات الخاصة بمنع تسرب بخار الماء إلى مخزن التبريد. ويتغير الضغط داخل الغرفة عن خارجها نتيجة سببين أساسيين هما: تغير الضغط الجوي خارج مخزن التبريد عن قيمة هذا الضغط عند إغلاق مخزن التبريد، وتغير درجة حرارة مخزن التبريد أثناء إغلاقه.

يتغير الضغط الجوي خلال ساعات اليوم وخلال أيام السنة، وذلك نتيجة تغير درجة حرارة الجو. فإذا كان الضغط الجوي في لحظة ما هو p_1 وتم إغلاق باب المخزن، فإن الضغط داخل المخزن يكون p_1 أيضا. بمرور الوقت يتغير الضغط الخارجي إلى p_2، بينما يبقى الضغط الداخلي كما هو عند p_1. ويكون فرق الضغط المؤثر على الحوائط والوصلات هو

$$\Delta p = p_2 - p_1 \tag{6.7}$$

فإذا كان الضغط p_1 أعلى من p_2 أي كان فرق الضغط سالبا لزم تسرب مقدارًا من هواء مخزن التبريد إلى الخارج لمعادلة الضغط، وإذا كانت Δp موجبه لزم دخول مقدار من الهواء الخارجي إلى مخزن التبريد لمعادلة الضغوط. وبفرض أن الهواء غازًا مثاليًا، وأن معادلة الضغوط تتم عند درجة حرارة ثابتة داخل

مخزن التبريد، فإن حجم الهواء المتسرب من أو إلى مخزن التبريد يعطى كما يلي:

$$\Delta V = \frac{\Delta P}{P_2} V \tag{6.8}$$

حيث V هي حجم مخزن التبريد. ويكون سريان الهواء من الخارج إلى الداخل إذا كانت ΔV موجبة، ومن الداخل إلى الخارج إذا كانت ΔV سالبة.

تتغير درجة الحرارة الداخلية لمخزن التبريد أثناء فترة خفض درجة الحرارة عند بداية التشغيل، عندئذ يتغير الضغط الداخلي بالمخزن إذا كان المخزن محكم الإغلاق. فإذا كان الضغط داخل المخزن هو p_1 عندما كانت درجة الحرارة هي T_1 فإن التغير في الضغط عندما تنخفض درجة الحرارة إلى T_2 يكون كما يلي:

$$\Delta p = p_1 \frac{T_1 - T_2}{T_2} \tag{6.9}$$

وبالطبع تكون Δp موجبة حيث إن T_2 أقل من T_1 . ويكون حجم الهواء المطلوب تسربه إلى مخزن التبريد لمعادلة الضغط الداخلي بالضغط الخارجي هو:

$$\Delta V = V \frac{T_1 - T_2}{T_2} \tag{6.10}$$

وذلك بفرض أن الهواء يعتبر غازًا مثاليًا. وكما بينا سابقًا يسرى الهواء إلى داخل المخزن التبريد إذا كانت ΔV موجبه وإلى خارج المخزن إذا كانت ΔV سالبة. وبفرض أن فترة تغير الضغط داخل المخزن هي $\Delta\tau$، فإن معدل سريان الهواء من أو إلى مخزن التبريد تعطى كما يلي:

$$\Delta \dot{V} = \Delta V / \Delta \tau \tag{6.11}$$

بينا فيما سبق ضرورة سريان هواء بين مخزن التبريد والجو الخارجي لمعادلة الضغوط. فإذا كان سرعة سريان الهواء هي u فإن مساحة السريان تعطى كما يلي:

$$A = \Delta\dot{V}/u \tag{6.12}$$

ويستخدم لهذا الغرض أنابيب مساحة مقطعها A، ويركب على هذه الأنابيب منظمات ضغط تسمح بسريان الهواء خلالها فقط عندما يزيد فرق الضغط بين مخزن التبريد والجو الخارجي عن فرق ضغط السماح لمنظم الضغط. ومن الخبرات المكتسبة في تشغيل مخازن التبريد ينصح دائما بترك باب مخزن التبريد مفتوح بقدر ضئيل أثناء خفض درجة حرارة مخزن التبريد عند بداية التشغيل لمنع تغير الضغط داخل مخزن التبريد.

مثال ٦,٢

مخزن تبريد حجمه ٤٠٠ متر مكعب عند درجة حرارة قدرها ٣٠^{o}م وضغط جوي قدره ١٠١,٣ كيلوبسكال.

أ) احسب التغير في الضغط إذا انخفضت درجة الحرارة داخل المخزن إلى −٢٠^{o}م بمعدل قدره ٥ ^{o}م /ساعة. ثم احسب معدل سريان الهواء المطلوب دخوله إلى المخزن لمعادلة الضغط داخل المخزن مع الضغط الخارجي.

ب) بعد وصول درجة حرارة المخزن إلى −٢٠م تغير الضغط الجوي إلى ١٠٢,٢ كيلوبسكال. احسب معدل حجم الهواء اللازم دخوله إلى المخزن لمعادلة الضغط داخل المخزن مع الضغط الجوي.

الحل

أ) يقدر الزمن اللازم لخفض درجة الحرارة من ٣٠°م إلى -٢٠°م كما يلي:

$$\Delta\tau = [30-(-20)]/5 = 10 \text{ hr}$$

ويحسب التغير في الضغط داخل المخزن في نهاية فترة خفض درجة الحرارة كما يلي:

$$\Delta p = 101.3 \times \frac{30+20}{273+30} = 16.7 \text{ kPa}$$

ويكون الضغط داخل المخزن كما يلي:

$$p_2 = 101.3 - 16.7 = 84.7 \text{ kPa}$$

ويقدر معدل سريان الهواء المطلوب دخوله إلى المخزن كما يلي:

$$\Delta\dot{V} = \frac{400}{10} \times \frac{30+20}{303} = 6.6 \text{ m}^3/\text{hr}$$

وبفرض سرعة هواء قدرها ٢ م/ث تكون مساحة السريان كما يلي:

$$A = \frac{6.6}{3600 \times 2} = 9.2 \text{ cm}^2$$

أي أنبوب بقطر قدره ٣,٤ سم.

ب) بعد وصول المخزن إلى حالة الاستقرار عند -٢٠°م ومعادلة الضغط مع الضغط الجوي عند ١٠١,٣ كيلوباسكال، وتغير الضغط

الخارجي إلى ١٠٢,٢ كيلوباسكال فإن حجم الهواء اللازم دخوله إلى المخزن يقدر كما يلي:

$$\Delta V = \frac{\Delta p}{p_2} V = \frac{102.2 - 101.3}{102.2} \times 400 = 3.5 \text{ m}^3$$

الرموز ومعانيها للفصل السادس

h	معامل انتقال الحرارة بالحمل [وات/(م٢.كلفن)]
k	الموصلية الحرارية [وات/م.°م]
q	معدل انتقال الحرارة لكل وحدة مساحة [وات/م٢]
U	معامل انتقال الحرارة الكلي [وات/(م٢.كلفن)]
u	سرعة السريان [م/ث]
V	السرعة [م/ث]
$\dot{V}$	معدل السريان الحجمي [م٣/ث]
x	السمك [متر]

الحروف الإغريقية

$\Delta\tau$	فرق الزمن [ث]

الفصل السابع
حمل التبريد

٧,١ تعريف حمل التبريد

حمل التبريد لغرفة تبريد هو معدل الحرارة المطلوب سحبها من الغرفة للمحافظة على درجة الحرارة ونسبة الرطوبة ثابتتين داخل الغرفة. ويتضح من هذا التعريف تغير حمل التبريد لغرفة التبريد لحظيًا مع الزمن تبعًا لتغير العوامل المختلفة التي تؤثر في حمل التبريد. ويتكون حمل التبريد لغرفة التبريد من المكونات الآتية:

أ) حمل التبريد الناتج عن انتقال الحرارة بين غرفة التبريد والأماكن المحيطة بها وذلك خلال الحوائط والسقف والأرضية.

ب) حمل التبريد للمواد المخزنة بغرفة التبريد.

ج) حمل التبريد الداخلي لغرفة التبريد، وهو الحمل الناتج عن الإضاءة والأشخاص العاملين بغرفة التبريد، وكذلك عن أي معدات ميكانيكية أو كهربائية قد توجد بغرفة التبريد وينتج عنها حرارة.

د) حمل الهواء المتسرب إلى غرفة التبريد من خارجها أثناء فتح باب غرفة التبريد.

هـ) حمل التبريد الناتج عن موتور مروحة المبادل الحراري لهواء غرفة التبريد.

و) حمل التبريد الناتج عن نظام إذابة الصقيع بغرفة التبريد.

هذا وسوف نقدم في الأجزاء التالية كيفية حساب حمل التبريد لكل من المكونات السابقة.

٧,٢ حمل التبريد نتيجة انتقال الحرارة بالحوائط والأسقف والأرضية

تختلف درجة حرارة غرفة التبريد عن درجة حرارة الجو المحيط بها في معظم الأحوال. فإذا كان فرق درجة الحرارة بين داخل غرفة التبريد وخارجها هو ΔT ، فإن معدل الحرارة المنتقلة من خارج الغرفة إلى داخلها خلال أي سطح يعطى كما يلي:

$$\dot{Q}=UA\Delta T \quad (7.1)$$

حيث A هي مساحة السطح وU هو معامل انتقال الحرارة الكلي بين غرفة التبريد وخارجها خلال السطح المعني. وتحسب قيمة U بدلالة المواد المكونة للحائط (انظر الفصل الرابع) كما يلي:

$$U=\frac{1}{R_i+\sum_j \frac{x_j}{k_j}+R_o} \quad (7.2)$$

حيث تمثل R_i وR_o على التوالي المقاومة الحرارية للسطح الداخلي والسطح الخارجي للحائط المعنى بالدراسة، بينما تمثل x_j سمك المادة j الداخلة في تكوين الحائط و k_j هي معامل التوصيل الحراري لهذه المادة. ويمكن عادة إهمال R_i و R_o مقارنة بالمقاومة الحرارية للحائط، لذا يمكن الاستعاضة عن معادلة (7.2) بالمعادلة الآتية:

$$U=\frac{1}{\sum_j x_j / k_j} \quad (7.3)$$

ويمكن إذا تم إهمال جميع المقاومات الحرارية ماعدا المقاومة الحرارية بسبب العازل الحراري استبدال المعادلة السابقة بالمعادلة البسيطة التالية:

$$U=\frac{k_i}{x_i} \qquad (7.4)$$

حيث k_i هي الموصلية الحرارية للعازل المستخدم و x_i هي سمك هذا العازل. وتعطي المعادلة (7.4) قيمة U بدقة مقبولة هندسيًا مقارنة بقيمة U التي يمكن الحصول عليها من معادلة (7.2).

ويعتمد حساب قيمة ΔT في المعادلة (7.1) على درجة الحرارة الداخلية T_R بغرفة التبريد ودرجة الحرارة T_e على السطح الخارجي للحائط. وتؤخذ درجة الحرارة T_R مساوية لدرجة حرارة التخزين المطلوبة بغرفة التبريد، أما درجة حرارة السطح الخارجي فتؤخذ مساوية لدرجة حرارة الجو الخارجي، أي مساوية T_o، إذا كان السطح الخارجي للحائط معرض مباشرة للجو الخارجي. أما إذا كان هذا السطح معرضًا للشمس، وجب تصحيح هذه الدرجة بإضافة فرق درجات الحرارة ΔT_c الموضحة بجدول ٧,١ تبعًا للون السطح المعني، أي إن

$$T_e = T_o + \Delta T_c \qquad (7.5)$$

جدول ٧,١ تصحيح درجة حرارة السطح المعرض للشمس [ASHRAE 1994].

لون السطح الخارجي	اتجاه الحائط			
	الشرق	الجنوب	الغرب	سطح أفقي
	°م	°م	°م	°م
أسطح داكنة اللون	٥	٣	٥	١١
أسطح متوسطة اللون	٤	٣	٤	٩
أسطح فاتحة اللون	٣	٢	٣	٥

ويضاف التصحيح المعطى بالجدول إلى درجة الحرارة الخارجية لتعويض التأثير الناتج لتعرض سطح المخزن للشمس.

٧,٣ حمل التبريد للمواد المخزنة

ينقسم حمل التبريد للمواد المخزنة إلى قسمين. حمل التبريد الأولي وحمل التبريد الناتج عن التنفس، وسنناقش كل قسم بمفرده.

دعنا نفرض أن هناك كتلة m_p من المواد المخزونة التي تم إدخالها إلى غرفة التبريد، وكانت درجة حرارة هذه المواد عند دخولها إلى المخزن هي T_a، والمطلوب تخزين هذه المواد بغرفة التبريد عند درجة حرارة تخزين قدرها T_R، وهى درجة حرارة غرفة التبريد. بالطبع يجب أولا معرفة ما إذا كانت هذه المواد ستحفظ في حالة التجمد أم فوق التجمد، أي يجب معرفة علاقة T_a و T_R بدرجة التجمد T_{fr} للمواد المخزنة. أيضًا، يعتمد حمل التبريد الأولي على عدد الساعات n اللازمة لخفض درجة حرارة المواد المخزنة من T_a إلى T_R. ويمكن حساب حمل التبريد الأولي للمواد المخزنة من العلاقات الآتية تبعًا لحالة المواد المخزنة

أ) تخزين عند درجة حرارة أعلى من درجة التجمد:

$$\dot{Q}_p = \frac{m_p C_p (T_a - T_R)}{3600n} \tag{7.6}$$

حيث C_p هي الحرارة النوعية للمواد المخزنة.

ب) تخزين عند درجة حرارة دون درجة حرارة التجمد مع وصول المواد المخزنة عند درجة حرارة أعلى من د رجة حرارة التجمد:

$$\dot{Q}_p = \frac{m_p}{3600n}[C_p(T_a - T_{fr}) + h_{fr} + C_{pfr}(T_{fr} - T_R)] \quad (7.7)$$

حيث h_{fr} هي الحرارة الكامنة لتجمد المواد المخزنة و C_{pfr} هي الحرارة النوعية للمواد المخزنة عند درجة حرارة دون درجة التجمد T_{fr}.

ج) تخزين عند درجة حرارة دون درجة حرارة التجمد مع وصول المواد المخزنة عند درجة حرارة دون درجة التجمد:

$$\dot{Q}_p = \frac{m_p C_{pfr}(T_a - T_R)}{3600n} \quad (7.8)$$

ولقد أعطت جمعية المهندسين الأمريكيين للتبريد وتكييف الهواء جداول للخواص الحرارية للمواد الغذائية وشروط تخزينها، كما عرضنا في الفصل الخامس. ويمكن حساب الحرارة النوعية للمواد الغذائية فوق درجة التجمد أو تحت درجة التجمد من المعادلة (5.2) بالفصل الخامس.

أما حمل التنفس فهو بسبب تتنفس الفواكه والخضراوات أثناء تخزينها، وينتج عن هذه العملية حمل حراري بغرفة التبريد. ويعتمد هذا الحمل على درجة حرارة التخزين لهذه الفواكه والخضراوات، فيزيد هذا الحمل بارتفاع درجة حرارة التخزين ويقل بانخفاضها. ويبين جدول ٥,١ (بالفصل الخامس) قيم حرارة التنفس h_r للعديد من الفواكه والخضراوات. وبفرض أن كتلة المواد المخزنة من بعض أنواع الفاكهة أو الخضراوات هي m (كجم)، فإن حرارة التنفس $\dot{Q}_r$ (كيلووات) عندئذ تعطى كما يلي:

$$\dot{Q}_r = \frac{mh_r}{1000 \times 1000} \quad (7.9)$$

حيث h_r بوحدات ملي وات/كجم.

٧,٤ حمل التبريد الداخلي

يشمل حمل التبريد الداخلي لغرفة التبريد الأجزاء التالية:

- حمل التبريد الناتج عن الإضاءة.
- حمل التبريد الناتج عن الأشخاص الموجودين بغرفة التبريد.
- حمل التبريد الناتج عن معدات نقل المواد المخزنة، كالأوناش المتحركة مثلا.
- حمل التبريد الناتج عن أي موتورات، مثل موتور مروحة المبادل الحراري لهواء غرفة التبريد (إن وجد).
- حمل التبريد الناتج عن دورة إذابة الصقيع (إن وجد).

يتغير حمل التبريد الناتج عن الأجزاء السابقة خلال اليوم من ساعة لأخرى. فمثلا يتغير حمل التبريد الناتج عن الإضاءة تبعًا لحالة الإضاءة بالغرفة أي إذا كانت الإضاءة كاملة أو جزئية أو بدون إضاءة، كذلك يتغير حمل التبريد الناتج عن الأشخاص تبعًا لعدد الأشخاص الموجودين بالغرفة، وهكذا. ولتسهيل حسابات حمل التبريد، يستخدم حمل التبريد المتوسط يوميًا كأساس لحساب حمل التبريد بغرف التبريد، كما سيتضح فيما يلي.

يحسب حمل التبريد الناتج عن الإضاءة (كيلووات) من المعادلة البسيطة الآتية:

$$\dot{Q}_{light} = W A F_u F_a \frac{n}{24000} \qquad (7.10)$$

حيث W هي قيمة شدة الإضاءة بالوات/م^2 بغرفة التبريد وA هي مساحة أرضية الغرفة و F_u هي معامل الاستعمال للإضاءة (أي نسبة لمبات الإضاءة المستخدمة فعليًا إلى لمبات الإضاءة الكلية الموجودة بالغرفة) و F_a هي معامل السماح،

وهو معامل يعتمد على نوع لمبات الإضاءة المستخدمة وتكون F_a مساوية ١,٢ عند استخدام لمبات فلوريسينت وتكون F_a مساوية ١,٠ عند استخدام لمبات تنجستون، وتمثل n عدد ساعات إضاءة اللمبات في اليوم الواحد (أي في ٢٤ساعة). وتؤخذ W عادة حوالي ١٠وات/م^2 داخل غرف التبريد، وتصل إلى حوالي من ١٥ إلى ٢٠وات/م^2 في الأماكن الأخرى من مخازن التبريد، مثل غرف المعدات، والممرات، وأماكن التحميل والتفريغ...الخ.

ويعتمد حمل التبريد الناتج عن الأشخاص الموجودين بغرفة التبريد على درجة حرارة الغرفة والملابس التي يرتديها هؤلاء الأشخاص، وكذلك على مدى نشاطهم. ويبين جدول ٧,٢ حمل التبريد المتوسط لفرد واحد عند درجات حرارة مختلفة بغرفة التبريد. ويمكن الاستعاضة عن الجدول بالمعادلة الآتية:

$$q = (272 - 6T_R)/1000 \qquad (7.11)$$

جدول ٧,٢ متوسط معدل الحرارة المنتقلة من الأشخاص إلى غرفة التبريد [ASHRAE 1994].

درجة حرارة غرفة التبريد م°	متوسط معدل الحرارة المنتقلة إلى غرفة التبريد للشخص الواحد كيلووات / شخص
١٠	٠,٢١٠
٥	٠,٢٤٠
صفر	٠,٢٧٠
٥-	٠,٣٠٠
١٠-	٠,٣٣٠
١٥-	٠,٣٦٠
٢٠-	٠,٣٩٠

حيث T_R (°م) هي درجة حرارة غرفة التبريد، و q (كيلووات/شخص) هي متوسط معدل الحرارة الناتج من شخص واحد. عندئذ يقدر حمل التبريد العاملين في نقل البضائع من وإلى غرفة التبريد كما يلي:

$$\dot{Q}_{people}=N_p(272-6T_R)\frac{n_p}{24000} \qquad (7.12)$$

حيث N_p عدد الأشخاص العاملين بغرفة التبريد و n_p عدد الساعات للوجود بالغرفة يوميًا.

تستخدم مخازن التبريد معدات لنقل المواد المخزنة من وإلى داخل غرف التبريد. ويعمل بعض هذه المعدات يدويًا، بينما يعمل البعض الآخر آليًا بواسطة محرك، وفى هذه الحالة يفضل المحركات التي تعمل ببطارية كهربائية يعاد شحنها من آن إلى آخر بدلا من محركات الاحتراق الداخلي للحماية من عوادم الاحتراق داخل مخازن التبريد التي تكون بالطبع مغلقة ومحدودة التهوية. ويقدر معدل حمل التبريد $\dot{Q}_{fl}$ (كيلووات) الناتج من أوناش نقل المواد المخزنة كما يلي:

$$\dot{Q}_{fl}=N_f W\times\frac{n}{24000} \qquad (7.13)$$

حيث N_f هي عدد الأوناش التي تعمل بغرفة التبريد، وW (وات) هي قدرة موتور محرك الونش، و n هي عدد الساعات التي يوجد فيها كل ونش داخل غرفة التبريد يوميًا. ويمكن تقديرًا أخذ قيمة W حوالي ٣٠٠٠ وات لكل ونش، إذا لم تتوفر قيمة W للأوناش المستخدمة أثناء عملية حساب حمل التبريد.

النوع الأول: كل من الموتور والقدرة الناتجة منه تفقد داخل غرفة التبريد، مثل وجود موتور مروحة ملف التبريد والمروحة داخل غرفة التبريد.

جدول ٧,٣ حمل التبريد المكافئ للموتورات [ASHRAE 1994].

قدرة الموتور	حمل التبريد المكافئ كيلووات/ كيلووات من قدرة الموتور		
كيلووات	النوع الأول	النوع الثاني	النوع الثالث
٠,١ إلى ٠,٤	١,٨	١,٠	٠,٨
٠,٤ إلى ٢,٢	١,٥	١,٠	٠,٥
٢,٢ إلى ١٥	١,٣	١,٠	٠,٣

النوع الثاني: الموتور خارج غرفة التبريد بينما القدرة الناتجة منه داخل الغرفة، مثل وجود موتور مضخة توزيع ماء مثلج أو ماء ملح خارج الغرفة والمضخة داخل الغرفة، أو مثل وجود موتور مروحة ملف التبريد خارج الغرفة بينما توجد المروحة داخل الغرفة.

النوع الثالث: الموتور داخل الغرفة والقدرة الناتجة منه خارج الغرفة، مثل وجود موتور مروحة داخل غرفة التبريد بينما توجد المروحة خارج الغرفة، أو وجود موتور مضخة داخل الغرفة ووجود المضخة خارج الغرفة.

وينتج عن الموتورات والمعدات المتصلة بها أيضًا حمل تبريد داخلي. ويجب أخذ هذا الحمل في الاعتبار عند حساب الحمل الكلي لغرفة التبريد. ويعتمد هذا الحمل على مكان الموتور والمعدات المتصلة به. فمثلا إذا وجد موتورًا لتشغيل مروحة توزيع هواء أو مروحة ملف تبريد أو مضخة ماء مثلج. عندئذ قد يوجد الموتور والمروحة أو المضخة داخل غرفة التبريد، أو يوجد الموتور خارج غرفة التبريد، بينما توجد المروحة أو المضخة داخل الغرفة، أو يوجد الموتور داخل الغرفة والمروحة أو المضخة خارج الغرفة. ويعطي جدول ٧,٣ حمل التبريد المكافئ للموتورات في الحالات الثلاثة السابقة. عندئذ يقدر حمل التبريد (كيلووات) للموتورات والمعدات المتصلة بها لغرفة التبريد كما يلي:

$$\dot{Q}_{motor} = \sum_{i=1}^{m} (\mathrm{kW})_i (C)_i \frac{n_i}{24} \qquad (7.14)$$

حيث m هي عدد الموتورات وC هي حمل التبريد المكافئ لكل كيلووات من قدرة الموتور (انظر جدول ٧,٣)، و kW هي قدرة الموتور بالكيلووات، و n هي عدد ساعات عمل الموتور يوميًا.

ومن المصادر الأخرى لحمل التبريد، الحمل الحراري الناتج عن دورة إذابة الصقيع لملفات التبريد بغرفة التبريد، إن وجد. فمن المعروف تكون الصقيع (الجليد) على هذه الملفات إذا كانت تعمل عند درجة حرارة أقل من درجة الصفر المئوي. ويسبب هذا الصقيع منع مرور الهواء على ملف التبريد، مما يقلل من سعة التبريد التي يعطيها الملف. لهذا السبب يلزم استخدام مصدر حراري لإذابة هذا الصقيع على فترات زمنية دورية. ويساهم جزء من الحرارة المستخدمة لإذابة هذا الصقيع في زيادة حمل التبريد لغرفة التبريد. ويقدر حمل التبريد $\dot{Q}_{def}$ (كيلووات) الناتج عن إذابة الصقيع كما يلي

$$\dot{Q}_{def} = \sum_{i=1}^{n_{cc}} [n_{cyc} (\mathrm{kW})_{cyc} \, F_{def} \frac{t_{cyc}}{60}]_i \qquad (7.15)$$

حيث n_{cyc} هو عدد دورات إذابة الصقيع يوميًا لملف التبريد و $(\mathrm{kW})_{cyc}$ هو معدل الحرارة المستخدمة لإذابة الصقيع، و F_{def} هو معامل الحمل لإذابة الصقيع، و t_{cyc} هي الفترة الزمنية لدورة الصقيع (بالدقيقة)، و n_{cc} هو عدد ملفات التبريد بالغرفة. ويعتمد عدد دورات إذابة الصقيع على درجة حرارة الغرفة، فيؤخذ عادة ٤ دورات يوميًا إذا كانت درجة حرارة الغرفة بين صفر إلى -٤°م، وحوالي ٦ دورات يوميًا إذا كانت درجة حرارة الغرفة حوالي -٣٠°م. ويعتمد أيضًا طول الفترة الكلية لإذابة الصقيع على درجة حرارة الغرفة. فتكون هذه الفترة حوالي ٦٠ دقيقة يوميًا لغرف التبريد عند درجة حرارة بين

صفر إلى -٤°م، وتكون حوالي ١٢٠ دقيقة يوميًا إذا كانت درجة حرارة غرفة التبريد حوالي -٣٠°م. ويعتمد معامل الحمل F_{def} على نوع المصدر الحراري المستخدم لإذابة الصقيع، فتكون قيمة F_{def} مساوية لـ ٠,٥ إذا استخدمت الكهرباء كمصدر حراري و ٠,٤ إذا استخدم الغاز الساخن كمصدر حراري.

مما سبق، يقدر المتوسط اليومي لحمل التبريد الداخلي (كيلووات) بغرفة تبريد كما يلي

$$\dot{Q}_{\text{int}} = \dot{Q}_{light} + \dot{Q}_{people} + \dot{Q}_{fl} + \dot{Q}_{motor} + \dot{Q}_{def} \qquad (7.16)$$

مثال ٧,١

احسب حمل التبريد الداخلي لغرفة تبريد لها المواصفات الآتية:

- الإضاءة : لمبات فلورسنت، ١٢ وات/م^{٢}، ٦٠٪ إضاءة لمدة ٨ ساعات يوميًا.
- الأشخاص : عدد ٣ أشخاص، لمدة ٣ ساعات يوميًا داخل الغرفة.
- مساحة الغرفة : ٤ متر × ٦ متر.
- درجة حرارة الغرفة : -١٠°م.
- الأوناش : عدد ونش واحد لمدة ٦ ساعات يوميًا.
- ملفات التبريد : عدد ٢ ملف تبريد، لكل ملف موتور واحد لمروحة الهواء بقدرة ٠,٢٥ كيلووات، داخل الغرفة، وتعمل دورة إذابة الصقيع بالكهرباء بمعدل تسخين قدرة ١ كيلووات لكل ملف.

الحل

يقدر المتوسط اليومي لمعدل حمل التبريد بسبب الإضاءة كما يلي:

$$\dot{Q}_{light} = 12 \times 4 \times 6 \times 0.6 \times 1.2 \times \frac{8}{24000} = 0.069 \text{ kW}$$

ويقدر المتوسط اليومي لمعدل حمل التبريد للأشخاص كما يلي:

$$\dot{Q}_{people} = 3(272 + 6 \times 10) \times \frac{3}{24000} = 0.125 \text{ kW}$$

ويقدر المتوسط اليومي لمعدل حمل التبريد الناتج عن الونش كما يلي:

$$\dot{Q}_{fl} = 1 \times 3000 \times \frac{6}{24000} = 0.75 \text{ kW}$$

وحيث إن درجة حرارة الغرفة –١٠°م، نأخذ فترة إذابة الصقيع حوالي ٧٠ دقيقة يوميًا باستخدام ٤ دورات. عندئذ يقدر المتوسط اليومي لمعدل حمل التبريد نتيجة إذابة الصقيع بملفات التبريد كما يلي:

$$\dot{Q}_{def} = 2 \times 4 \times 1 \times 0.5 \times \frac{70}{4 \times 60} = 1.167 \text{ kW}$$

وتعمل مروحة ملفات التبريد في جميع الأوقات ماعدا عند تشغيل دورة إذابة الصقيع. عندئذ يقدر المتوسط اليومي لمعدل حمل التبريد لموتورات مراوح ملفات التبريد كما يلي:

$$\dot{Q}_{motor} = 2 \times 0.25 \times 1.8 \times \frac{(24 - 70/60)}{24} = 0.856 \text{ kW}$$

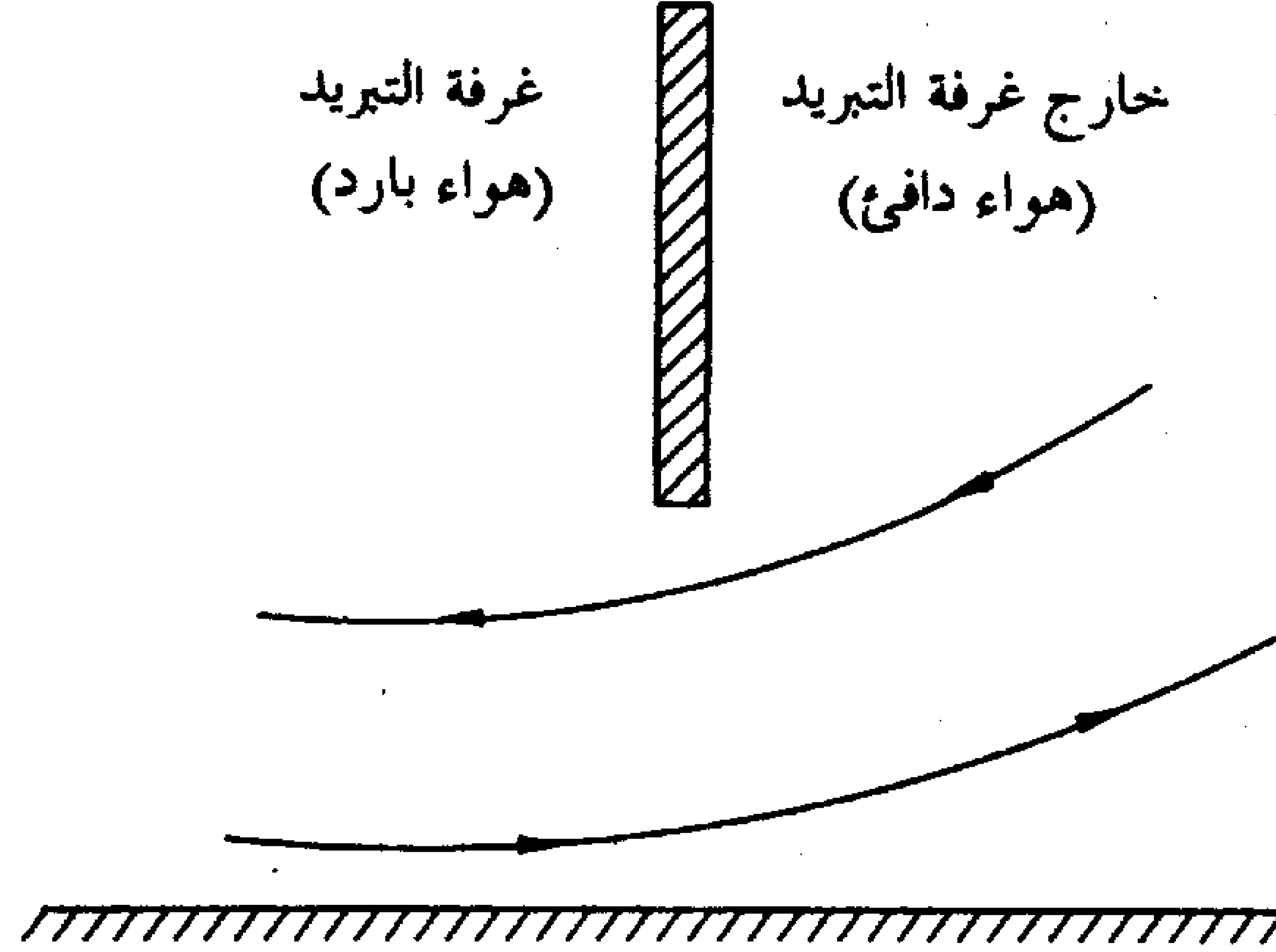
ويكون إجمالي المتوسط اليومي لمعدل حمل التبريد الداخلي بالغرفة كما يلي:

$$\dot{Q}_{int} = 0.069 + 0.125 + 0.75 + 1.167 + 0.856 = 2.97 \text{ kW}$$

٧,٥ حمل التبريد للهواء الخارجي المتسرب إلى غرفة التبريد

دعنا نفرض أن الظروف الداخلية لغرفة التبريد هي درجة حرارة T_R ورطوبة نسبية ϕ_R؛ وأن الظروف خارج باب غرفة التبريد هي درجة حرارة T_o ورطوبة نسبية ϕ_o. عند فتح باب غرفة التبريد، يتولد فرق ضغط بين الهواء

الخارجي والهواء الداخلي نتيجة اختلاف كثافة كل منهما. وينتج عن هذا الفرق في الضغط سريان هواء من الخارج إلى الداخل في الجزء العلوي من الباب، ومن الداخل إلى الخارج في الجزء السفلي من الباب (انظر شكل ٧,١).



شكل ٧,١ حركة الهواء خلال باب غرفة التبريد.

وبتوقيع حالتي الهواء داخل وخارج غرفة التبريد على خريطة السيكرومتري، كما هو موضح بشكل ٧,٢، نجد أن عملية تسرب الهواء من الحالة "O" إلى الحالة "R" تتبع عملية لها عامل حرارة محسوسة قدره:

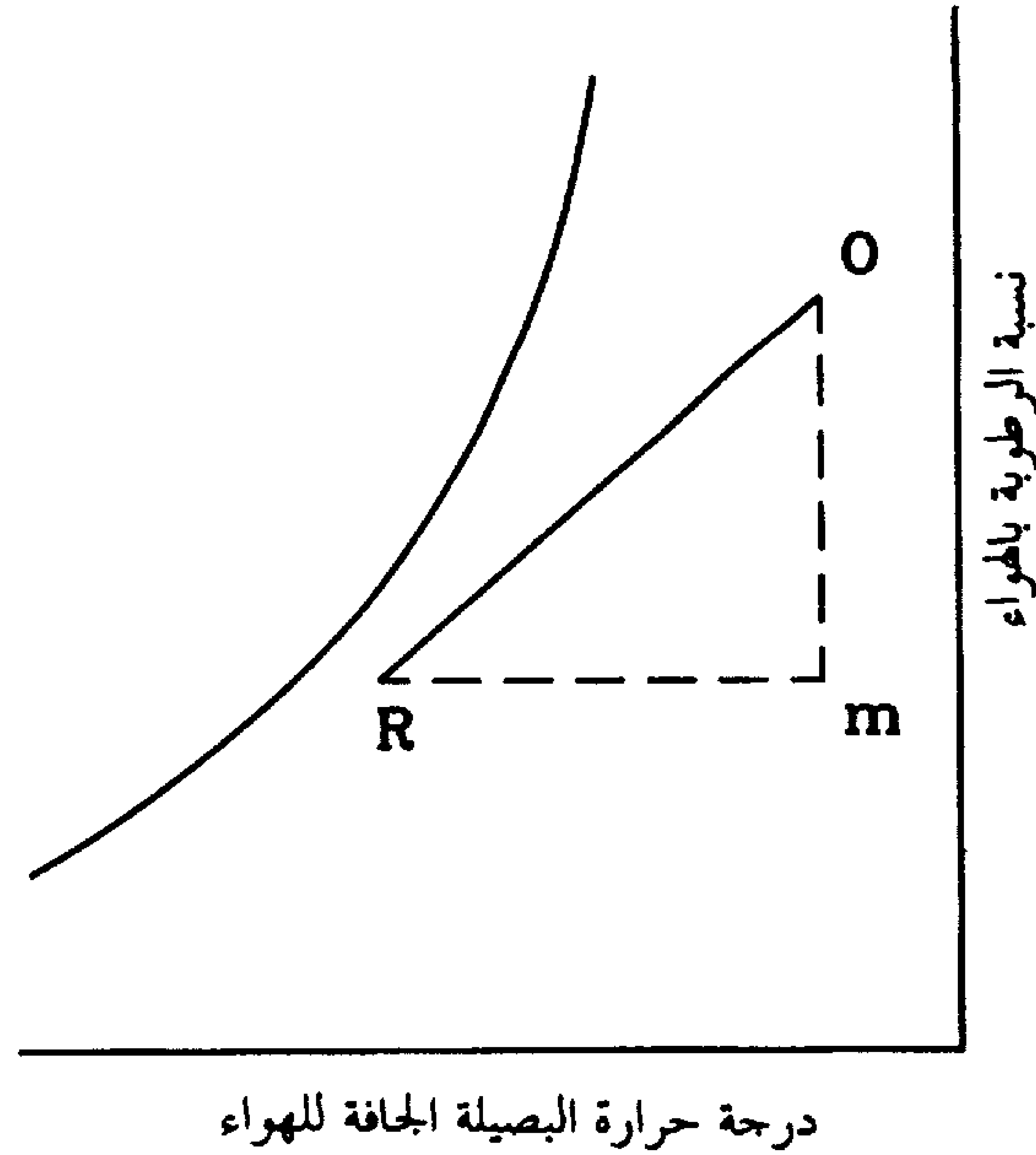
$$SHR = \frac{h_m - h_R}{h_o - h_R} \qquad (7.17)$$

حيث h هي إنثالبي الهواء، وتعني التذييلات m و R وO حالات الهواء الموضحة بشكل ٧,٢. ويمكن كتابة المعادلة السابقة في الشكل التالي:

$$SHR = \frac{(C_{pa} + C_{pv} W_R)(T_o - T_R)}{(C_{pa} + C_{pv} W_R)(T_o - T_R) + (W_o - W_R) h_{fg}} \qquad (7.18)$$

حيث C_{pa} هي الحرارة النوعية عند ضغط ثابت للهواء الجاف (= ١,٠ كيلوجول / كجم°م)، و C_{pv} هي الحرارة النوعية عند ضغط ثابت لبخار الماء

(= ١,٨٠٥ كيلوجول/كجــم °م)، و h_{fg} هي الحرارة الكامنــة لتبخر الماء (= ٢٥٠١ كيلوجول/كجم) ، و W هي نسبة الرطوبة بالهواء (كجم ماء/كجم هواء جاف). ويمكن كتابة المعادلة السابقة في الصورة الآتية:



شكل ٧,٢ تمثيل عملية تسرب الهواء الخارجي عند الحالة "*O*" إلى غرفة تبريد عند الحالة "*R*".

$$\text{SHR} = \frac{(1+1.805\,W_R)\,(T_o - T_R)}{(1+1.805\,W_R)\,(T_o - T_R) + 2501\,(W_o - W_R)} \tag{7.19}$$

ويبين جدول ٧,٤ حساب قيم SHR من المعادلة السابقة لغرف تبريد عند درجات حرارة T_R تتراوح بين −٤٠ و ١٠°م عند رطوبة نسبية Φ_R قدرها ٠,٩، ولهواء خارجي له درجة حرارة تتراوح بين صفر و ٥٠°م رطوبة نسبية تتراوح بين ٠,٢ و ١,٠.

ويحسب حمل التبريد Q_{inf} (وات) للهواء المتسرب خلال فتحة باب غرفة التبريد من العلاقة الآتية [ASHRAE 1994]:

$$\dot{Q}_{\text{inf}} = Q_{ss}\,D_t\,D_f\,(1-E) \tag{7.20}$$

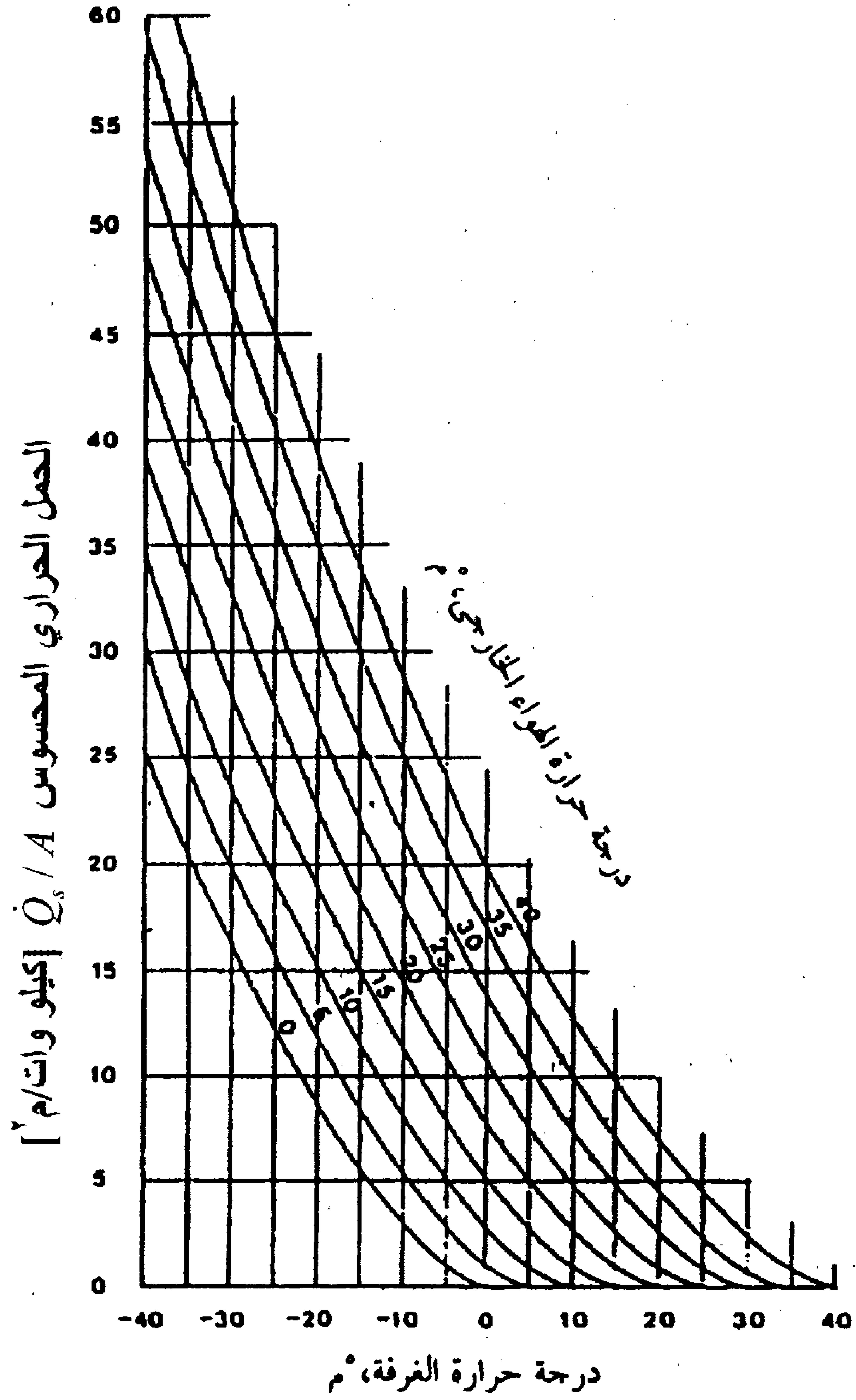
حيث D_t هي عامل زمن فتح الباب، و D_f هي عامل السريان خلال الباب و E هي فعالية أجهزة حماية التسرب من الباب، و Q_{ss} هي حمل التبريد للهواء المتسرب خلال الباب عند حالة الاستقرار. وتحسب قيمة Q_{ss} (وات) من العلاقة الآتية التي أوردها جوزني وعلما [Gosney and Olama,1975].

$$\frac{\dot{Q}_{ss}}{A}=0.221\rho_R(1-\frac{\rho_o}{\rho_R})^{0.5}(gH)^{0.5}(\frac{2}{1+(\rho_R/\rho_o)^{1/3}})^{1.5}\times(h_o-h_R) \qquad (7.21)$$

حيث ρ_R و ρ_o هما على التوالي كثافة الهواء بغرفة التبريد وخارجها(كجم/م^٣) و H هي ارتفاع الباب (م) و g هي عجلة الجاذبية الأرضية (٩,٨١م/ث^٢)، h_R و h_o هما إنثالبي الهواء (كيلوجول/كجم) بغرفة التبريد وخارجها على التوالي. ولتبسيط حساب قيمة $\dot{Q}_{ss}$، اقترحت جمعية آشري استبدال المعادلة السابقة بالعلاقة الآتية [ASHRAE 1994]:

$$\dot{Q}_{ss}=0.577BH^{1.5}(\frac{\dot{Q}_s}{A})\times\frac{1}{\text{SHR}} \qquad (7.22)$$

حيث B (متر) هي عرض باب غرفة التبريد وH (متر) هي ارتفاع الباب وSHR هي عامل الحرارة المحسوسة لعملية تسرب الهواء إلى غرفة التبريد، و $(\dot{Q}_s/A)$ هي حمل الحرارة المحسوسة لكل وحدة مساحة من باب الغرفة (وات/م^٢)، للهواء المتسرب إلى غرفة التبريد عند حالة الاستقرار. وتحسب قيمة$\dot{Q}_s/A$ من شكل ٧,٣ بدلالة درجة حرارة غرفة التبريد ودرجة حرارة الهواء الخارجي المتسرب خلال باب الغرفة [ASHRAE 1994]، بينما تحسب قيمة SHR من جدول ٧,٤ كما قدمنا سابقاً.



شكل ٧,٣ تغير $\dot{Q}_s / A$ مع درجتي حرارة الهواء داخل وخارج غرفة التبريد عند فتح الباب كليا والوصول عند حالة الاستقرار [ASHRAE 1998].

جدول ٧,٤ قيم عامل الحرارة المحسوسة SHR لعملية تسرب الهواء الخارجي إلى غرفة التبريد [ASHRAE 1998].

الهواء الخارجي		درجة حرارة غرفة التبريد، درجة مئوية										
T °C	φ	-40	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10
50	1.0	0.29	0.28	0.26	0.25	0.24	0.23	0.22	0.20	0.19	0.18	0.16
50	0.8	0.34	0.33	0.32	0.3	0.29	0.28	0.26	0.25	0.23	0.22	0.21
50	0.6	0.42	0.40	0.39	0.37	0.36	0.34	0.33	0.31	0.30	0.28	0.27
50	0.4	0.52	0.51	0.49	0.48	0.46	0.45	0.43	0.42	0.41	0.39	0.38
50	0.2	0.69	0.68	0.67	0.66	0.65	0.63	0.63	0.62	0.62	0.62	0.64
45	1.0	0.34	0.32	0.31	0.3	0.28	0.27	0.25	0.24	0.22	0.21	0.19
45	0.8	0.39	0.38	0.36	0.35	0.33	0.32	0.3	0.29	0.27	0.25	0.24
45	0.6	0.47	0.45	0.44	0.42	0.41	0.39	0.37	0.36	0.34	0.32	0.31
45	0.4	0.57	0.56	0.55	0.53	0.51	0.5	0.48	0.47	0.45	0.44	0.44
45	0.2	0.73	0.72	0.71	0.7	0.69	0.68	0.67	0.67	0.67	0.69	0.73
40	1.0	0.39	0.37	0.36	0.34	0.33	0.31	0.29	0.27	0.26	0.24	0.22
40	0.8	0.45	0.43	0.42	0.4	0.38	0.36	0.35	0.33	0.31	0.29	0.27
40	0.6	0.52	0.51	0.49	0.47	0.46	0.44	0.42	0.40	0.38	0.37	0.35
40	0.4	0.63	0.61	0.6	0.58	0.57	0.55	0.53	0.52	0.51	0.5	0.5
40	0.2	0.77	0.76	0.75	0.74	0.73	0.73	0.72	0.72	0.73	0.76	0.84
35	1.0	0.45	0.43	0.41	0.39	0.37	0.36	0.34	0.31	0.29	0.27	0.25
35	0.8	0.5	0.49	0.47	0.45	0.43	0.41	0.39	0.37	0.35	0.33	0.31
35	0.6	0.58	0.56	0.55	0.53	0.51	0.49	0.47	0.45	0.43	0.42	0.4
35	0.4	0.68	0.66	0.65	0.63	0.62	0.6	0.58	0.57	0.56	0.56	0.58
35	0.2	0.81	0.8	0.79	0.78	0.77	0.77	0.77	0.77	0.79	0.85	0.99
30	1.0	0.5	0.49	0.47	0.45	0.43	0.4	0.38	0.36	0.33	0.31	0.28
30	0.8	0.56	0.54	0.53	0.51	0.48	0.46	0.44	0.42	0.39	0.37	0.35
30	0.6	0.63	0.62	0.6	0.58	0.56	0.54	0.52	0.50	0.48	0.47	0.46
30	0.4	0.72	0.71	0.7	0.68	0.66	0.65	0.64	0.63	0.62	0.63	0.68
30	0.2	0.84	0.83	0.83	0.82	0.81	0.81	0.81	0.83	0.86	0.96	
25	1.0	0.56	0.54	0.52	0.5	0.48	0.45	0.43	0.40	0.37	0.34	0.31
25	0.8	0.62	0.6	0.58	0.56	0.54	0.51	0.49	0.47	0.44	0.42	0.4
25	0.6	0.68	0.67	0.65	0.63	0.61	0.59	0.57	0.55	0.54	0.53	0.54
25	0.4	0.77	0.75	0.74	0.73	0.71	0.7	0.69	0.68	0.69	0.72	0.86
25	0.2	0.87	0.86	0.86	0.85	0.85	0.85	0.86	0.88	0.95		
20	1.0	0.62	0.6	0.58	0.56	0.53	0.5	0.48	0.45	0.41	0.38	0.34

الهواء الخارجي		درجة حرارة غرفة التبريد، درجة مئوية										
T °C	φ	-40	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10
20	0.8	0.67	0.65	0.63	0.61	0.59	0.57	0.54	0.51	0.49	0.47	0.45
20	0.6	0.73	0.72	0.7	0.68	0.66	0.64	0.62	0.61	0.6	0.61	0.68
20	0.4	0.81	0.79	0.78	0.77	0.76	0.75	0.74	0.74	0.77	0.87	
20	0.2	0.9	0.89	0.88	0.88	0.88	0.88	0.9	0.95			
15	1.0	0.67	0.65	0.63	0.61	0.58	0.55	0.52	0.49	0.45	0.41	0.35
15	0.8	0.72	0.7	0.69	0.66	0.64	0.62	0.59	0.56	0.54	0.52	0.55
15	0.6	0.78	0.76	0.75	0.73	0.71	0.69	0.68	0.67	0.67	0.73	
15	0.4	0.84	0.83	0.82	0.81	0.8	0.79	0.79	0.81	0.88		
15	0.2	0.92	0.91	0.91	0.91	0.91	0.92	0.95				
10	1.0	0.73	0.71	0.68	0.66	0.63	0.6	0.57	0.53	0.49	0.42	0
10	0.8	0.77	0.75	0.73	0.71	0.69	0.66	0.64	0.62	0.6	0.62	0
10	0.6	0.82	0.8	0.79	0.77	0.76	0.74	0.73	0.73	0.78		
10	0.4	0.87	0.86	0.85	0.84	0.84	0.84	0.85	0.90			
10	0.2	0.93	0.93	0.93	0.93	0.94	0.96					
5	1.0	0.77	0.75	0.73	0.71	0.68	0.65	0.61	0.57	0.5	0	0.58
5	0.8	0.81	0.79	0.78	0.76	0.73	0.71	0.69	0.67	0.69	0	0.44
5	0.6	0.85	0.84	0.83	0.81	0.8	0.79	0.79	0.82			
5	0.4	0.9	0.89	0.88	0.88	0.87	0.88	0.92				
5	0.2	0.95	0.95	0.95	0.95	0.96						
0	1.0	0.81	0.8	0.77	0.75	0.72	0.69	0.65	0.58	0	0.65	0.57
0	0.8	0.85	0.83	0.81	0.8	0.78	0.75	0.74	0.75	0	0.52	0.51
0	0.6	0.88	0.87	0.86	0.85	0.84	0.83	0.86				
0	0.4	0.92	0.91	0.91	0.91	0.91	0.93					
0	0.2	0.96	0.96	0.96	0.97	0.99						

يعرف عامل زمن فتح الباب بأنه نسبة زمن فتح الباب بالثانية يوميًا إلى عدد الثواني في اليوم الواحد، أي إن

$$D_t = \frac{P \ \theta_p + 60\theta_o}{3600 \times 24} \tag{7.23}$$

حيث P هي عدد المرات التي يفتح خلالها الباب يوميًا، و θ_p (ثانية) هو زمن فتح الباب كل مرة، و θ_o (دقيقة) هو الزمن الكلي يوميًا التي يبقى الباب عندها مفتوحًا خلافًا لمرات فتح الباب.

أيضًا، يعرف عامل السريان D_f خلال الباب بأنه نسبة المعدل الحقيقي لسريان الهواء خلال الباب إلى معدل سريان الهواء خلال الباب عند حالة الاستقرار. وتؤخذ قيمة D_f مساوية ٠,٨ إذا كان فرق درجات الحرارة بين خارج الغرفة وداخلها يزيد عن١١°م، ومساوية ١,١ إذا قل هذا الفرق عن ١١°م [ASHRAE 1994]. وتعتمد قيمة الفعالية E لأجهزة حماية التسرب من الباب على نوع هذه الأجهزة. فتؤخذ E مساوية ٠,٩٥ أو أكثر عن استخدام ستائر الشرائح البلاستيكية، بينما تقل هذه الفعالية عن ٠,٧ في حالة استخدام ستائر الهواء.

ولمزيد من التفاصيل حول حساب حمل التبريد الناتج عن الهواء المتسرب إلى مخازن التبريد يمكن للقارئ الرجوع إلى: Cole 1984 , Jones *et al.* 1993. ASHRAE 1998, ASHRAE 1994 ، والسيد (١٩٩٧).

مثال ٧,٢

غرفة تبريد لها باب عرضة ٣ متر وارتفاع ٢متر. احسب المتوسط اليومي لمعدل حمل التبريد الناتج عن تسرب الهواء الخارجي إلى غرفة التبريد إذا كانت الغرفة تعمل عند −١٠°م وكانت ظروف الممر الخارجي المجاور لباب الغرفة عند ١٥°م و ٦٠٪ رطوبة نسبية. افرض الآتي:

- باب الغرفة يفتح ١٢ مرة كل ساعة خلال ٨ ساعات عمل يوميًا، مدة فتح الباب كل مرة دقيقة واحدة.
- يفتح الباب لمدة نصف ساعة متصلة يوميًا.

- لا يستخدم الباب أي وسيلة للحماية من التسرب أثناء فتحة.

الحل

من الخريطة بشكل ٧,٣ لغرفة تبريد عند −١٠°م وهواء خارجي عند ١٥°م نجد أن:

$$(\frac{\dot{Q}_s}{A})=12 \quad kW/m^2$$

من جدول ٧,٤ نجد أن قيمة عامل الحرارة المحسوسة SHR لعملية تسرب الهواء يساوي ٠,٦٨، عندئذ تحسب قيمة Q_{ss} من معادلة (7.22) كما يلي

$$\dot{Q}_{ss}=0.577\times3\times2^{1.5}\times12\times\frac{1}{0.68}=86.4 \quad kW$$

من معادلة (7.23) نحسب معامل الزمن D_t كما يلي:

$$D_t=\frac{12\times8\times60+60\times30}{3600\times24}=0.0875$$

وحيث إن الفرق بين درجة الحرارة خارج الغرفة وداخلها يساوي ٢٥°م أي يزيد عن ١١°م فإن عامل السريان D_f يؤخذ يساوي ٠,٨، أيضًا تؤخذ E تساوي صفرا لعدم استخدام أي وسيلة للحماية من التسرب أثناء فتح الباب. عندئذ يقدر المتوسط اليومي لحمل التبريد نتيجة تسرب الهواء الخارجي إلى غرفة التبريد كما يلي:

$$\dot{Q}_{\inf}=\dot{Q}_{ss}D_tD_f(1-E)$$

$$=86.4\times0.0875\times0.8\times(1-0) \quad =6.05 \quad kW$$

٧,٦ حمل التبريد الإجمالي لغرف التبريد

بينا فيما سبق الأجزاء المختلفة لحمل التبريد لغرف التبريد. ويتكون الحمل الإجمالي لغرفة التبريد من مجموع هذه الأجزاء. وتبعًا لقيمة حمل التبريد الإجمالي لغرفة التبريد يتم اختيار ملف أو ملفات التبريد المناسبة لغرفة التبريد كما سنبين فيما بعد في الفصل الثالث عشر. نلاحظ أن حساب الحمل الداخلي لغرفة التبريد يتطلب حساب حمل مواتير المراوح لملفات التبريد بالغرفة والحمل الناتج عن دورة إذابة الصقيع لمف التبريد (إن وجد)، وهذان الحملان يعتمدان على مواصفات ملف أو ملفات التبريد التي لم يتم اختيارها. لهذا السبب ينصح عادة حساب حمل التبريد الإجمالي لغرفة التبريد بدون أخذ حمل التبريد لمواتير مراوح ملفات التبريد وحمل التبريد الناتج عن دورة إذابة الصقيع في الاعتبار. ويستخدم هذا الحمل لاختيار ملفات التبريد، ثم يؤخذ حمل التبريد للمواتير ودورة إذابة الصقيع بعد ذلك. ويجب التأكد من أن سعة التبريد لملفات التبريد التي تم اختيارها تكفي لحمل التبريد الكلي لغرفة التبريد، وسنتعرض لمزيد من التفاصيل لهذا الموضوع فيما بعد.

الرموز ومعانيها للفصل السابع

A المساحة [م٢]

B عرض باب غرفة التبريد [م]

C الحمل الحراري المكافئ لكل كيلوات من قدرة الموتور [–]

C_p الحرارة النوعية للمواد الغذائية [كجول/كجم.°م]

C_{pfr} الحرارة النوعية للمواد الغذائية عند درجات حرارة ما دون درجة التجمد [كجول/كجم.°م]

D_f عامل السريان خلال الباب

D_t عامل زمن فتح الباب [–]

E فعالية أجهزة حماية التسرب [–]

F_a معامل السماح للإضاءة [–]

F_{def} معامل الحمل لإذابة الصقيع [–]

F_u معامل استعمال الإضاءة [–]

H ارتفاع باب غرفة التبريد [م]

h_{fg} الفرق في الانثالبي بين حالة التشبع في الحالة الغازية والسائلة [كجول/كجم]

h_{fr} الحرارة الكامنة لتجمد المادة الغذائية [كجول/كجم]

h_r حرارة التنفس للمادة الغذائية [ملي وات/كجم]

k_i الموصلية الحرارية للعازل الحراري، [وات/م.°م]

m_p كتلة المواد المراد تخزينها [كجم]

n عدد الساعات اللازمة لتبريد المواد الغذائية [ساعة]

n_{cc} عدد ملفات التبريد [–]

n_{cyc} عدد مرات دورات إذابة الصقيع [–]

N_f عدد الأوناش [–]

n_p عدد الساعات التي يمكثها العاملون في غرفة التبريد [ساعة]

N_p عدد الأشخاص العاملين في مخزن التبريد [–]

p عدد المرات التي يفتح فيها الباب يوميا

q متوسط الحرارة الناتجة من الشخص الواحد [كيلووات/شخص]

$\dot{Q}$ معدل انتقال الحرارة [وات او كيلوات]

$\dot{Q}_{def}$ الحمل الحراري نتيجة إذابة الصقيع [كيلووات]

$\dot{Q}_{fl}$ الحمل الحراري نتيجة الأوناش [كيلووات]

$\dot{Q}_{inf}$ الحمل الحراري نتيجة تسرب الهواء إلى غرفة التبريد [كيلووات]

$\dot{Q}_{int}$ مجموع الحمل الحراري الداخلي [كيلووات]

$\dot{Q}_{motor}$ الحمل الحراري نتيجة المواتير [كيلوات]

$\dot{Q}_{people}$ الحمل الحراري نتيجة الأشخاص [كيلووات]

$\dot{Q}_p$ معدل الحرارة النتيجة من المواد الغذائية [كيلووات]

$\dot{Q}_s$ حمل التبريد المحسوس نتيجة تسرب الهواء [كيلووات]

$\dot{Q}_{ss}$ حمل التبريد بسبب تسرب الهواء في حالة الاستقرار [كيلووات]

SHR معامل الحرارة المحسوسة [–]

T_a درجة حرارة المواد الغذائية عند دخولها مخزن التبريد، [°م]

Te درجة الحرارة الخارجية بعد التصحيح نتيجة لون جدار غرفة التبريد [°م]

T_{fr} درجة حرارة التجمد للمواد الغذائية، [°م]

T_o درجة الحرارة الخارجية [°م]

T_R درجة حرارة غرفة التبريد، [°م]

U معامل انتقال الحرارة الكلي [وات/م^{٢}.°م]

W قيمة شدة الإضاءة [وات]

W_o نسبة الرطوبة للهواء الهواء الخارجي [كجم ماء/كجم هواء]

W_R نسبة الرطوبة للهواء في غرفة التبريد [كجم ماء/كجم هواء]

x_i سمك العازل الحراري، [م]

التذييل

o الحالة للهواء الخارجي

R الحالة للهواء داخل غرفة التبريد

الحروف الإغريقية

ΔT_c معامل التصحيح لدرجة الحرارة الخارجية [°م]

φ الرطوبة النسبية [–]

θ_p زمن فتح الباب [ثانية]

θ_o الزمن الكلي اليومي الذي يبقى فيه الباب مفتوحا [دقيقة]

ρ الكثافة [كجم/م^3]

الفصل الثامن

نظم التبريد

٨,١ مقدمة

في الفصل الثاني قدمنا دورة التبريد بانضغاط البخار. وضم ذلك الفصل عرضًا موجزًا للدورة المثالية والدورة الفعلية في شكلها البسيط الذي يستخدم مرحلة واحدة للضاغط. وهناك بالطبع العديد من نظم التبريد المنبثقة من دورة التبريد بالانضغاط، ولكنها تحوي مكونات أخرى بالإضافة إلى المكونات التي عرضناها في الفصل الثاني، والتي شملت الضاغط والمكثف والمبخر وصمام التمدد.

في الفصل الحالي نقدم أهم نظم التبريد المستخدمة في مخازن التبريد. وتشمل هذه النظم الآتي :

أ) نظام التبريد أحادي المرحلة (أي ضاغط واحد) المستخدم لمبادل حراري بين المكثف والمبخر.

ب) نظام التبريد أحادي المرحلة المتعدد المبخرات.

ج) نظام التبريد متعدد المراحل المستخدم للمبردات البينية (المبرد البيني المغلق، أو المفتوح، أو مبرد المياه).

د) نظام التبريد ذو التغذية الزائدة لسائل المبرد.

ويضم الفصل الحالي التحليل الحراري لهذه النظم مع عرض موجز لمميزات وعيوب كل نظام.

٨,٢ نظم التبريد أحادية المرحلة

تقسم نظم التبريد، تبعًا لعدد مراحل الضاغط المستخدم في عملية الانضغاط، إلى نظم أحادية المرحلة، حيث يتم الانضغاط بمرحلة واحدة

بالضاغط، ونظم متعددة المراحل، حيث يتم الانضغاط في مرحلتين أو أكثر. وتتبع النظم أحادية المرحلة دورة التبريد بالانضغاط التي قدمناها فيما سبق في الفصل الثاني- إلا أن بعض النظم الأحادية يشمل اختلافًا أو أكثر عن دورة التبريد البسيطة المعطاة في شكل ٢,١ بالفصل الثاني. ومن هذه الاختلافات، على سبيل المثل وليس الحصر، الآتي:

أ) استخدام مبادل حراري بين المكثف والمبخر.

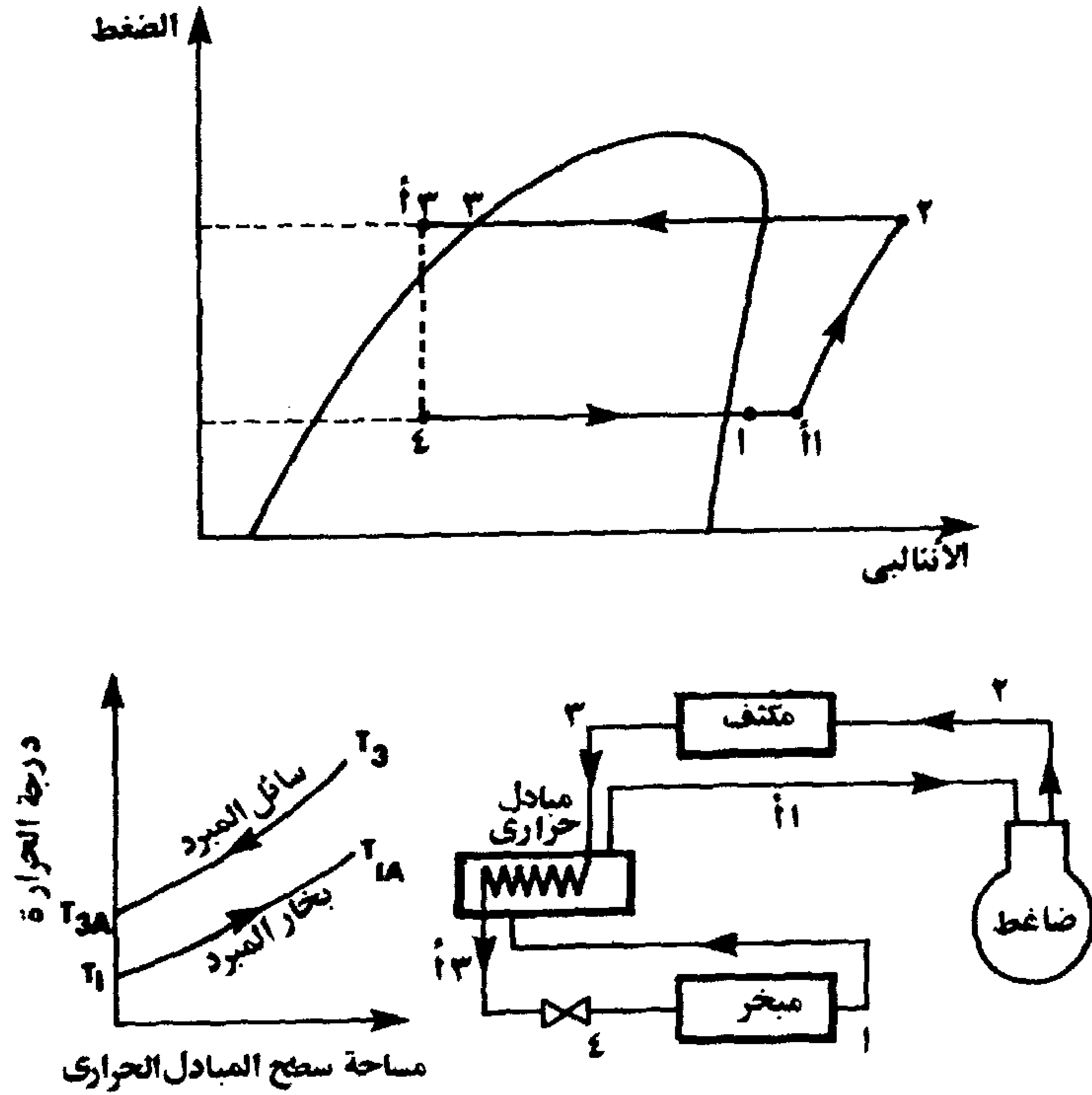
ب) استخدام أكثر من مبخر واحد في دورة التبريد الواحدة.

يبين شكل ٨,١ نظام تبريد أحادي المرحلة به مبادل حراري واحد. يستخدم المبادل الحراري للحصول على تبريد تحتي لسائل المبرد الداخل إلى صمام التمدد، مما يساعد على منع وجود بخار للمبرد عند دخول صمام التمدد نتيجة فقد الضغط في خط السائل، أو انتقال حرارة إلى هذا الخط من الجو المحيط. أيضًا، يعمل التبريد التحتي الذي يعطيه المبادل الحراري على تحسين التأثير التبريدي للمبخر، وبالتالي خفض معدل المبرد الذي يناوله الضاغط لكل وحدة سعة تبريد بالمبخر. ويعمل المبادل الحراري على تبريد سائل المبرد الخارج من المكثف أو المستقبل باستخدام بخار المبرد الخارج من المبخر، كما هو موضح بشكل ٨,١. كما يساعد استخدام المبادل الحراري أيضًا على ضمان دخول بخار المبرد إلى الضاغط في حالة البخار المحمص، مما يحمي الضاغط من أي سائل للمبرد قد يدخل إليه فيؤدي إلى تلفه ميكانيكيًا.

وبأخذ الاتزان الحراري للمبادل الحراري، يحسب الانخفاض في إنثالبي سائل المبرد في المبادل الحراري كما يلي:

$$h_3 - h_{3A} = h_{1A} - h_1 \tag{8.1}$$

ويمثل هذا الانخفاض الزيادة في التأثير التبريدي للمبخر. عندئذ يصبح معدل سريان المبرد في المبخر كما يلي:



شكل ٨,١ نظام تبريد أحادي المرحلة يحوي مبادلا حراريًا.

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_e}{h_1 - h_{3A}} \tag{8.2}$$

بينما تحسب قدرة الانضغاط كما يلي (بفرض انضغاط مثالي):

$$\dot{W}_c = \dot{m}(h_2 - h_{1A}) \tag{8.3}$$

وتحدد فعالية المبادل الحراري المستخدم مقدار التبريد التحتي الذي يعطيه المبادل الحراري. فمثلا إذا كانت ε هي فعالية المبادل الحراري، التي تعرف كما يلي:

$$\varepsilon = \frac{(T_{1A} - T_1)}{(T_3 - T_1)} \tag{8.4}$$

فإن T_{3A} تحسب من معادلة (8.1) بعد حساب T_{1A} من المعادلة السابقة، أي إن:

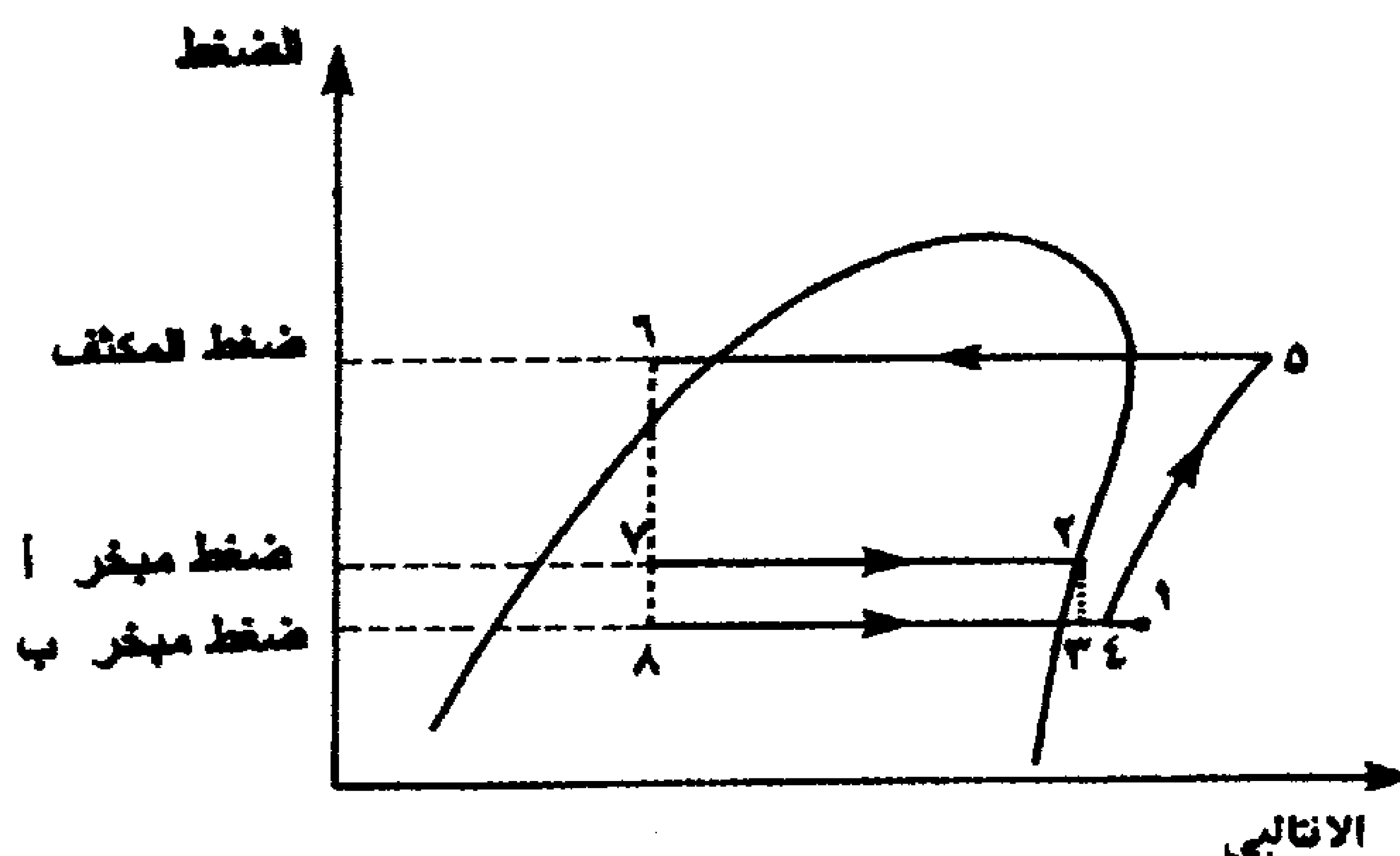
$$T_{3A} = T_3 - \frac{C_{pv}}{C_{pl}} \varepsilon (T_3 - T_1) \tag{8.5}$$

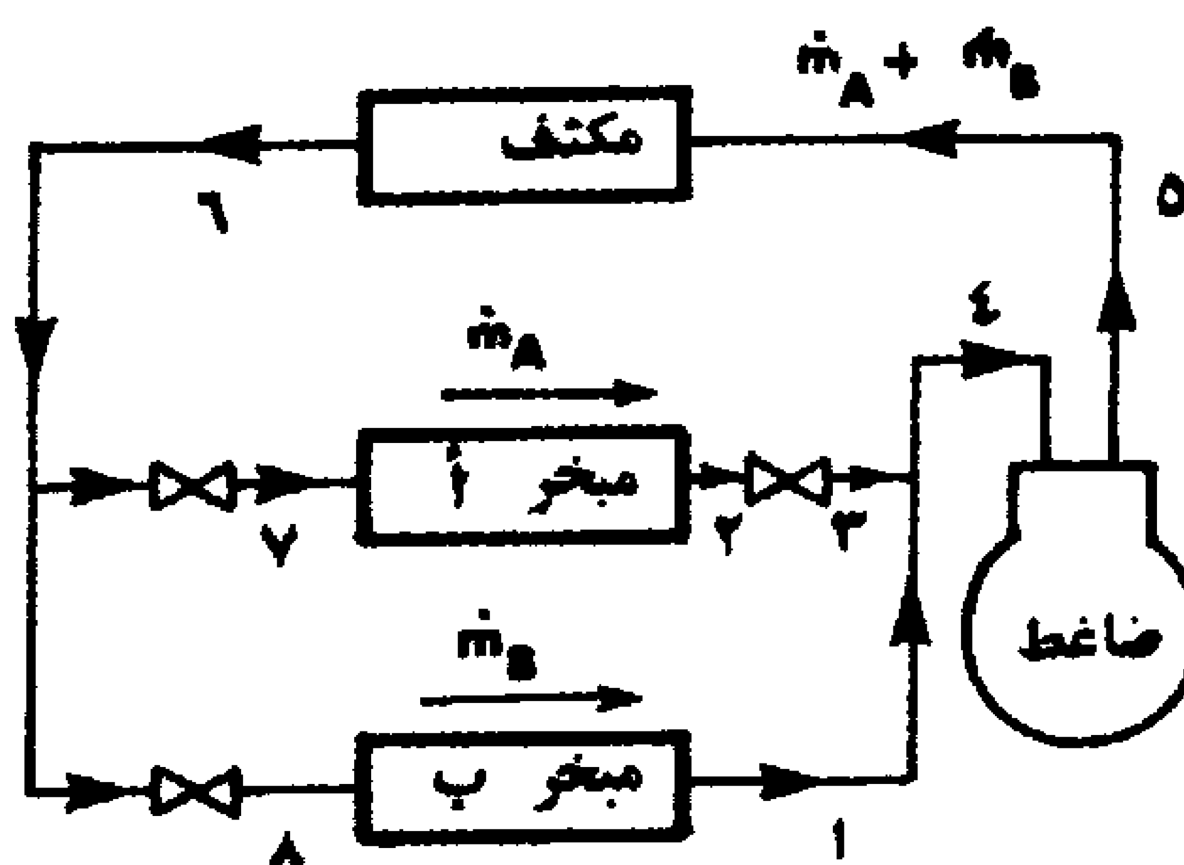
حيث C_{pl} و C_{pv} هي الحرارة النوعية عند ثبات الضغط لسائل المبرد ولبخار المبرد، على التوالي. وعمومًا يؤدي استخدام المبادل الحراري مع مبرد ١٢ أو مبرد ٥٠٢ أو مبرد ١٣٤أ إلى تحسين طفيف في أداء نظام التبريد، مما يخفض من تكلفة التشغيل، وإن كان بالطبع قد يضيف جزءًا إلى التكلفة الأولية للنظام. أما استخدام المبادل الحراري مع المبردات الأخرى، مثل مبرد ٢٢، فلا يؤدي إلى تحسين ملموس في أداء نظام التبريد [Gosney 1982].

يعطي شكل ٨,٢ اختلافًا آخر عن دورة التبريد البسيطة، فيبين الشكل نظام تبريد أحادي المرحلة يحوي مبخرين، أحدهما يعمل عند درجة حرارة مرتفعة نسبيًا عن الآخر. يوضع صمام تمدد عند دخول كل مبخر للتحكم في سريان المبرد إليه، كما هو موضح بالشكل. ويلزم وضع صمام خنق عند الخروج من المبخر " أ " ذي درجة الحرارة المرتفعة نسبيًا لخفض ضغط البخار الخارج من هذا المبخر إلى ضغط السحب بالضاغط، والمناظر لضغط المبخر "ب". ويقدر معدل سريان المبرد إلى المبخرين " أ " و "ب" على التوالي كما يلي

$$\dot{m}_B = \frac{(\dot{Q}_e)_A}{(h_2 - h_6)} \qquad (8.6A)$$

$$\dot{m}_B = \frac{(\dot{Q}_e)_B}{(h_1 - h_6)} \qquad (8.6B)$$





شكل ٨,٢ نظام تبريد أحادي يحوي مبخرين.

ويعمل الضاغط والمكثف بسريان يساوي $(\dot{m}_A + \dot{m}_B)$. وتضم بعض النظم الأخرى، المستخدمة في العديد من التطبيقات الصناعية، أكثر من مبخرين في بعض الأحيان. ويلزم التنويه هنا أنه كلما زاد فرق الضغط بين المبخرين، كلما كانت الدورة أقل ترشيدًا للطاقة نظرًا لخفض ضغط السريان $\dot{m}_A$ من الحالة ٢ إلى الحالة ٣ دون فائدة حقيقية، ثم رفع الضغط مرة أخرى بالضاغط. وقد يكون

من الأفضل في بعض الأحيان استبدال النظام الموضح بشكل ٨,٢ بنظام آخر ثنائي المرحلة، أي تستخدم فيه مرحلتان بالضاغط للقيام بعملية الانضغاط.

مثال ٨,١

أعد حل مثال ٢,١ بالفصل الثاني بعد استخدام مبادل حراري، كما هو مبين بشكل ٨,١. افرض أن درجة حرارة بخار المبرد الخارج من المبادل الحراري تساوي ٢٠°م.

الحل

أ) باستخدام حل مثال ٢,١ وخرائط وجداول مبرد ٢٢ نجد الضغط والإنثالبي عند الحالات المختلفة بالدورة المبينة بشكل ٨,١، مع ملاحظة أن الحالة ١ هي حالة بخار مشبع كما هو معطى في مثال ٢,١. ويعطي جدول ٨,١ ملخصًا لقيم الضغط والإنثالبي عند الحالات المختلفة بالدورة. بأخذ الاتزان الحراري للمبادل الحراري نصل إلى الآتي:

جدول ٨,١ حل مثال ٨,١.

الحالة	درجة الحرارة °م	الضغط كيلو بسكال	والإنثالبي كيلوجول/كجم	الحجم النوعي م^3/كجم
١	١٥-	٢٩٦,٢	٣٩٩,٢	
١أ		٢٩٦,٢	٤٢٣,٠	٠,٠٩٠٧
٢	٨٩,٥	١١٩٢,٩	٤٦٣,٨	
٣	٣٠	١١٩٢,٩	٢٣٦,٦	
٣أ	١٠,٧	١١٩٢,٩	٢١٢,٨	
٤	١٥-	٢٩٦,٢	٢١٢,٨	

$$h_{3A}=h_3-(h_{1A}-h_1)$$
$$=236.6-(423-399.2)=212.8 \quad kJ/kg$$

يحسب معدل سريان كتلة المبرد إلى المبخر عندئذ كما يلي:

$$\dot{m}=\frac{1}{(399.2-212.8)}=0.00536 \quad kg/s$$

وعليه يعطي معدل سريان الحجم إلى الضاغط كما يلي:

$$\dot{V}=\dot{m}\,v_{1A}=0.00536\times0.0907=4.86\times10^{-4} \quad m^3/s$$

وهو تقريبًا نفس القيمة المعطاة بمثال ٢,١ بالفصل الثاني (يمكن إهمال التغير في $\dot{V}$).

ب) من جدول ٨,١ نلاحظ ارتفاع درجة حرارة بخار المبرد الخارج من الضاغط إلى ٨٩,٥°م بالمقارنة بحوالي ٥٣°م في مثال ٢,١ بالفصل الثاني، مما قد يؤدي إلى تحلل زيت التزييت المصاحب لبخار المبرد. ويحسب معدل طرد الحرارة من المكثف كما يلي:

$$\dot{Q}_c=0.00536(463.8-236.6)=1.218 \quad kW$$

وهي تقريبًا نفس القيمة المعطاة بمثال ٢,١، أي أن استخدام مبادل حراري لم يؤثر على معدل طرد الحرارة من المكثف.

ج) تحسب قدرة الضاغط بفرض انضغاط أيزنتروبي كما يلي:

$$\dot{W}_c=0.00536(463.8-423)=0.2187 \quad kW$$

ويقدر معامل أداء الدورة عندئذ كما يلي:

$$COP=\frac{1}{0.2187}=4.57$$

د) تحسب الكفاءة النسبية للدورة كما يلي:

$$\eta_r=4.57\frac{(30+15)}{(273-15)}=0.798$$

ويلاحظ أن استخدام مبادل حراري لم يغير قيمة حجم البخار بخط سحب الضاغط، أو الحرارة المطرودة بالمكثف، أو قدرة الانضغاط، أو معامل أداء الدورة، وذلك نظرًا لاستخدام مبرد ٢٢. أما إذا استخدم مبرد ١٢ أو مبرد ١٣٤أ، فمن المتوقع تحسن معامل أداء الدورة. ويستخدم المبادل الحراري مع نظم التبريد المستخدمة لمبرد ٢٢ للحصول على تبريد تحتي في خط السائل للأسباب التي ذكرناها فيما سبق، وهي: التغلب على فقد الضغط وانتقال الحرارة بخط السائل لمنع وجود بخار مبرد عند دخول صمام التمدد.

٨,٣ نظم التبريد متعددة المراحل

تعرف الكفاءة الحجمية η_v (انظر الفصل ١٣) بأنها نسبة معدل سريان كتلة المبرد الفعلية إلى معدل سريان كتلة المبرد الافتراضية

$$\eta_v=\frac{\dot{m}_{act}}{\dot{m}_{th}} \qquad (8.7)$$

و يعرف خلوص الضاغط C بأنه نسبة حجم الضاغط عند أقصى حركة للكباس في شوط الانضغاط إلى حجم الضاغط في بداية مشوار الانضغاط. بفرض أن عملية الانضغاط في الضاغط بأنها عملية بوليتروبية (Polytropic process: PV^n=Const.) حيث n هو أس العلاقة بين الضغط والحجم، وعند إهمال كل العوامل الأخرى في حساب الكفاءة الحجمية ماعدا خلوص الضاغط يمكن إيجاد معادلة بسيطة للكفاءة الحجمية للضاغط كدالة في الضغط العالي

والضغط المنخفض وأس عملية البوليتروبة وخلوص الضاغط (انظر الفصل ١٣) كالآتي:

$$\eta_v = 1 + C - C\left(\frac{P_c}{P_e}\right)^{1/n} \qquad (8.8)$$

حيث P_c و P_e هما ضغطا المكثف والمبخر على التوالي.

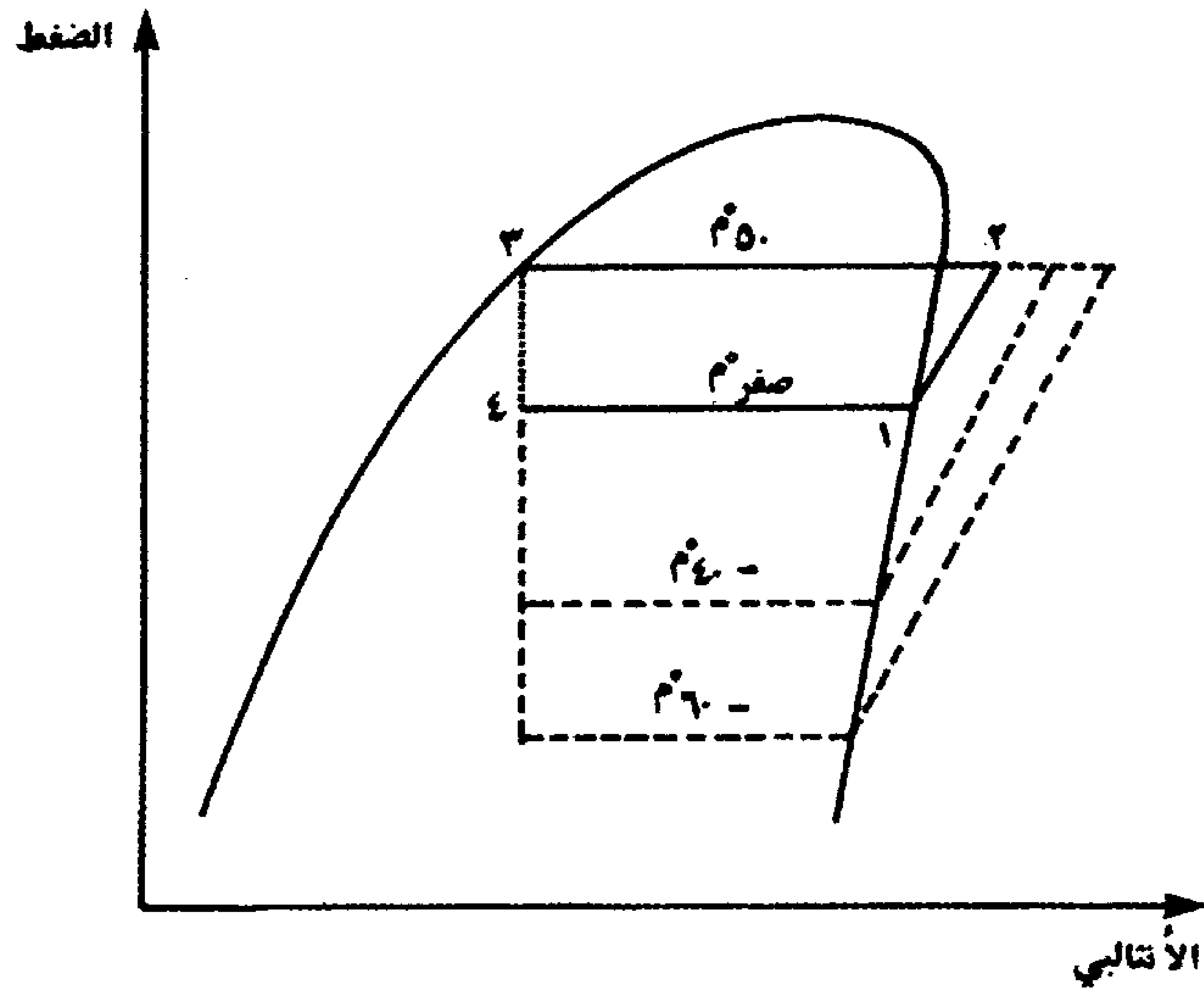
بانخفاض درجة حرارة المبخر، يسوء أداء نظم التبريد أحادية المرحلة، ولتوضيح هذا القول دعنا ندرس نظام تبريد أحادي المرحلة يتبع دورة التبريد البسيطة المعطاة بشكل ٢,١ بالفصل الثاني، ويستخدم هذا النظام مبرد ٢٢ عند درجة حرارة مكثف قدرها ٥٠°م ودرجة حرارة مبخر قدرها صفر°م مع ضاغط ترددي له نسبة خلوص ٣٪. نبدأ الآن في دراسة هذا النظام عند انخفاض درجة حرارة المبخر إلى −٤٠°م، ثم إلى −٦٠°م، كما هو مبين بشكل ٨,٣. ويبين جدول ٨,٢ ملخص هذه الدراسة. ويلاحظ من الجدول أنه بانخفاض درجة حرارة المبخر ينتج الآتي:

أ) انخفاض الكفاءة الحجمية للضاغط حتى تصبح قيمة هذه الكفاءة صغيرة جدًا عند درجات حرارة منخفضة بالمبخر.

ب) ارتفاع درجة حرارة البخار الخارج من الضاغط، مما يسبب تحلل زيت التزييت المصاحب لبخار المبرد، وأيضًا قد يسبب إجهادات بالضاغط نتيجة الفرق الكبير بين درجتي حرارة الدخول والخروج بالضاغط.

ج) انخفاض معامل أداء نظام التبريد بدرجة كبيرة.

د) زيادة الإجهادات التي تتعرض لها الأجزاء الميكانيكية المتحركة بالضاغط نظرًا لكبر نسبة الانضغاط.



شكل ٨,٣ تأثير انخفاض درجة حرارة المبخر على أداء نظام تبريد أحادي المرحلة يستخدم مبرد ٢٢.

جدول ٨,٢ تغير أداء نظام تبريد أحادي المرحلة مع انخفاض درجة حرارة المبخر(النظام يتبع دورة تبريد بسيطة عند درجة حرارة مكثف = ٥٠°م باستخدام مبرد ٢٢ وضاغط ترددي له نسبة خلوص = ٣٪، والنظام له سعة تبريد قدرها ١ كيلووات في المبخر).

درجة حرارة المبخر °م	h_1 كيلوجول/ كجم	h_2 كيلوجول/ كجم	T_2 °م	η_v ٪	$\dot{Q}_c$ كيلووات	COP
صفر	٤٠٥	٤٣٩,٣	٧٢	٩٤	١,٢٤	٤,١٤
٤٠-	٣٨٨,١	٤٦٥	١٠١	٧١	١,٦٢	١,٦٢
٦٠-	٣٧٨,٦	٤٨٦,١	١٢٥	٢٩	١,٩٣	١,٠٧

ولحل المشاكل السابقة ينصح باستخدام نظم تبريد متعددة المراحل، حيث تتم عملية الانضغاط في مرحلتين أو أكثر بالضاغط، مما يساعد على خفض

نسبة الانضغاط بكل مرحلة. عندئذ يفضل تبريد بخار المبرد الخارج من أية مرحلة قبل الدخول إلى المرحلة التالية، لخفض درجة حرارته. ولهذا الغرض يستخدم مبرد بيني، أي بين مرحلتين، ويعرف هذا المبرد عادة باسم المقتصد نظرًا لفائدته في اقتصاد الطاقة اللازمة لتشغيل نظام التبريد. ومن أهم أنواع المبردات البينية المستخدمة، الأنواع الثلاثة التالية:

أ) المبرد البيني المغلق.

ب) المبرد البيني المفتوح.

ج) مبرد المياه البيني.

وفيما يلي سنبين بعض نظم التبريد ثنائية المرحلة التي تستخدم المبردات البينية السابقة.

٨,٣,١ المبرد البيني المغلق

يبين شكل ٨,٤ نظام تبريد ثنائي المرحلة يحوي مبردًا بينيًا مغلقًا. وكما هو موضح بالرسم يعمل هذا المبرد على تبريد بخار المبرد الخارج من المرحلة الأولى من الضاغط، مما يساعد على خفض درجة الحرارة عند النقطة ٤. أيضًا، يعمل المبرد البيني الموضح بالشكل على زيادة التأثير التبريدي بالمبخر نظرًا لزيادة التبريد التحتي لسائل المبرد في المبرد البيني. فكما هو موضح بالشكل يقسم سائل المبرد في المبرد البيني إلى سريانيين أحدهما $\dot{m}$ والآخر $\Delta\dot{m}$. ويعمل السريان $\Delta\dot{m}$ على تبريد بخار المبرد من الحالة ٢ إلى الحالة ٣، وكذلك تبريد سائل المبرد الساري إلى المبخر من الحالة ٥ إلى الحالة ٧. ويعطي الاتزان الحراري للمبرد البيني العلاقة الآتية:

$$(\Delta\dot{m} + \dot{m})\, h_5 + \dot{m}\, h_2 = (\dot{m} + \Delta\dot{m})\, h_3 + \dot{m}\, h_7$$

ومنها ينتج الآتي:

$$\frac{\Delta \dot{m}}{\dot{m}} = \frac{(h_5 - h_7) + (h_2 - h_3)}{(h_3 - h_5)} \qquad (8.9)$$

ومن القانون الثاني للديناميكا الحرارية يشترط أن يكون:

$$T_7 \geq T_3 \qquad (8.10)$$

وتكون حالة التساوي للعملية المثالية لانتقال الحرارة في المبرد البيني (عندما يكون سطح انتقال الحرارة لانهائيًا)، وإلا زادت T_7 عن T_3 .

ويقدر معدل سريان المبرد خلال المبخر كما يلي:

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_e}{h_1 - h_8} \qquad (8.11)$$

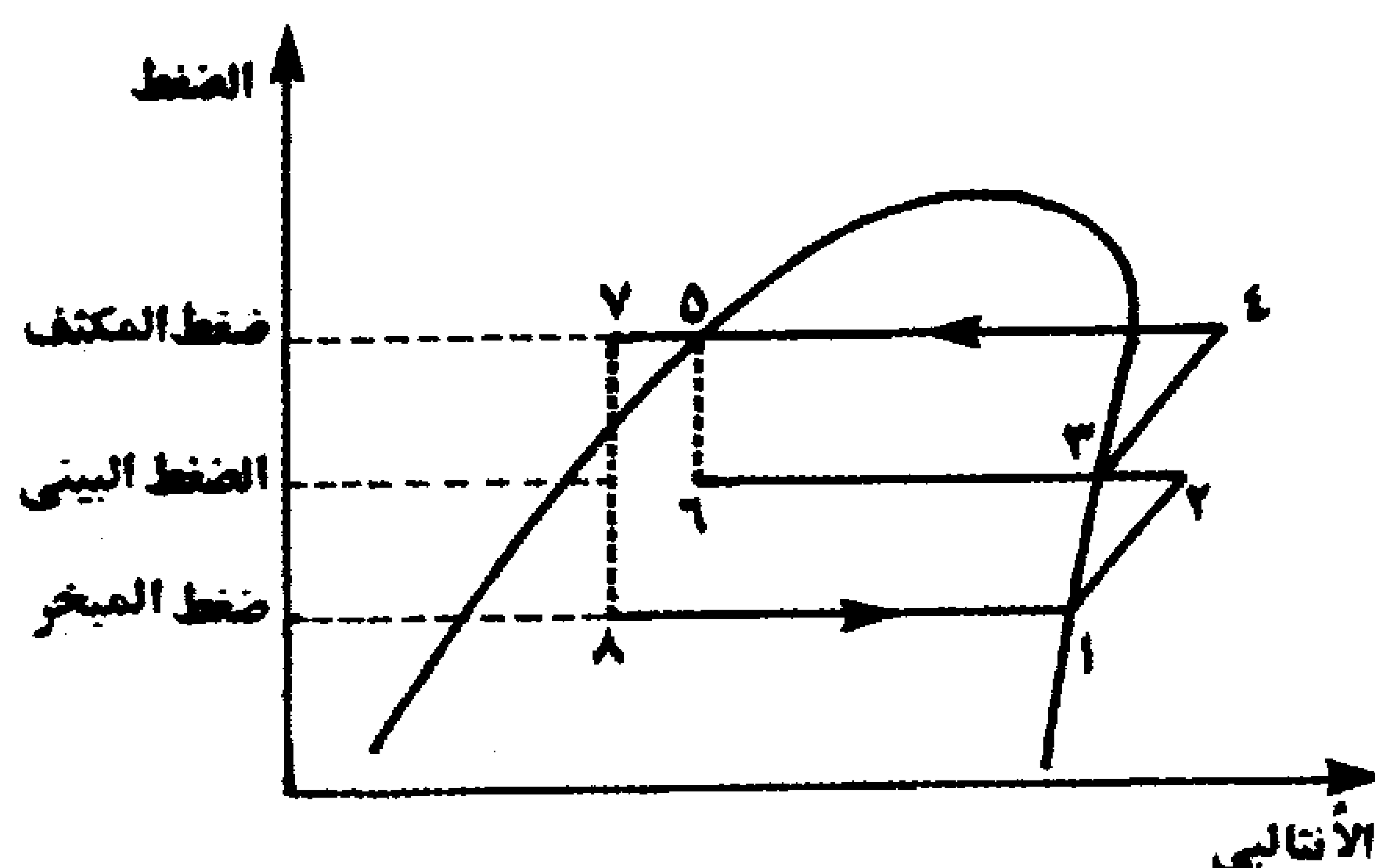
حيث $\dot{Q}_e$ هي معدل التبريد بالمبخر. كذلك تحسب قدرة الانضغاط في نظام التبريد المبين بشكل ٨,٤ كما يلي (بفرض انضغاط ايزنتروبي):

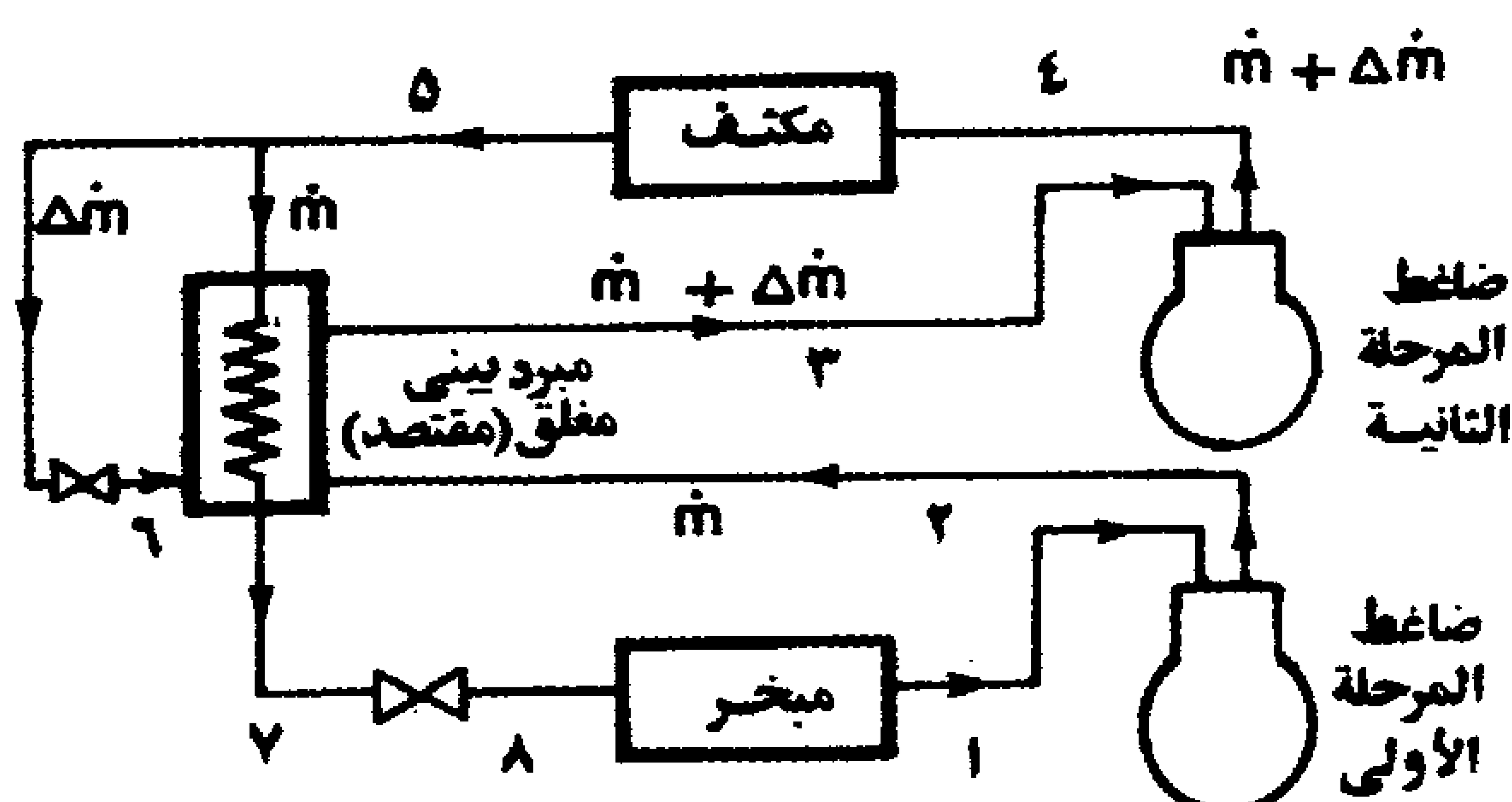
$$\dot{W}_c = \dot{m}(h_2 - h_1) + (\dot{m} + \Delta \dot{m})(h_4 - h_3) \qquad (8.12)$$

ويوضح المثال التالي كيفية الحسابات المصاحبة لهذا النوع من نظم التبريد.

مثال ٨,٢

في شكل ٨,٤ كانت درجة حرارة المكثف هي ٥٠°م ودرجة حرارة المبخر هي -٤٠°م، وكانت درجة حرارة التشبع المناظرة للضغط البيني هي صفر°م، باستخدام مبرد٢٢، أحسب الآتي بفرض١ كيلووات تبريد في المبخر:





شكل ٨,٤ نظام تبريد ثنائي المرحلة يحوي مبردًا بينيًا مغلقًا (مقتصد).

أ) أقصى درجة حرارة في نظام التبريد.

ب) معامل أداء نظام التبريد.

ج) معامل طرد الحرارة، أي الحرارة المطرودة بالمكثف لكل ١ كيلووات تبريد بالمبخر.

افرض حالة التشبع للحالات ١ و٣ و٥، وافرض أن الانضغاط ايزنتروبي في مرحلتي الضاغط. أيضًا افرض أن درجة الحرارة عند الحالة ٧ تزيد عن درجة الحرارة عند الحالة ٣ بمقدار ١٠ درجات مئوية.

الحل

باستخدام برنامج Refprop8 من [NIST] لمبرد ٢٢ ، يبين جدول ٨,٣ بعض خواص مبرد ٢٢ عند الحالات المختلفة لنظام التبريد بشكل ٨,٤.

أ) أقصى درجة حرارة بالنظام هي ٧٢°م وتحدث عند الحالة ٤.

ب) يعطي الاتزان الحراري للمبخر الآتي:

$$\dot{m} = \frac{1}{(388.1-212.1)} = 0.00568 \text{ kg/s}$$

ومن الاتزان الحراري للمقتصد (المبرد البيني) نحصل على الآتي:

$$\frac{\Delta \dot{m}}{\dot{m}} = \frac{(263.2-212.1)+(425.9-405)}{(405-263.2)} = 0.51$$

ومنها ينتج الآتي:

$$\Delta \dot{m} = 0.002884 \text{ kg/s}$$

يحسب معامل أداء النظام عندئذ كما يلي:

$$\text{COP}=\frac{1}{\dot{m}(h_2-h_1)+(\dot{m}+\Delta\dot{m})(h_4-h_3)}$$

$$=\frac{1}{0.00568(425.9-388.1)+(0.00568+0.002884)(439.3-405)} = 1.97$$

وهي بالتأكيد أفضل من القيمة المعطاة بجدول ٨,٢ وقدرها ١,٥٧ لنظام يعمل بمرحلة واحدة.

جدول ٨,٣ خواص مبرد ٢٢ عند الحالات المختلفة بشكل ٨,٤ لمثال ٨,٢.

الحالة	١	٢	٣	٤	٥	٦	٧	٨
درجة الحرارة، °م	٤٠-	٢٩	صفر	٧٢	٥٠	صفر	١٠	٤٠-
الضغط، كيلوبسكال	١٠٥,٢	٤٩٨	٤٩٨	١٩٤٢,٧	١٩٤٢,٧	٤٩٨	١٩٤٢,٧	١٠٥,٢
الإنثالبي كيلوجول/كجم	٣٨٨,١	٤٢٥,٩	٤٠٥	٤٣٩,٣	٢٦٣,٢	٢٦٣,٢	٢١٢,١	٢١٢,١

ج) يحسب معامل طرد الحرارة HRF بالمكثف كما يلي

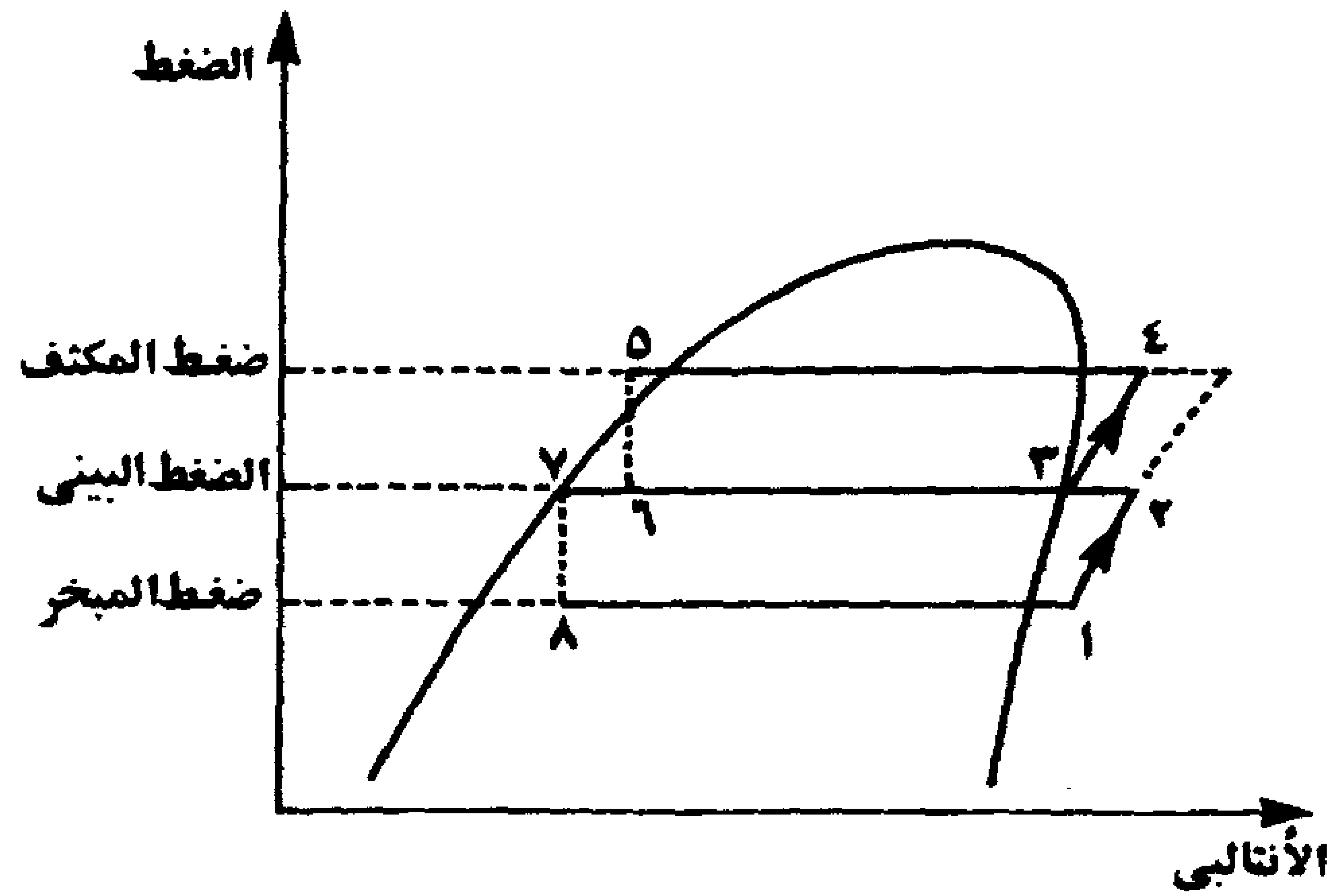
$$\begin{aligned}\text{HRF} &= (\dot{m}+\Delta\dot{m})(h_4-h_5)\\ &= (0.00568+0.002884)(439.3-263.2) = 1.508 \quad \text{kW}\end{aligned}$$

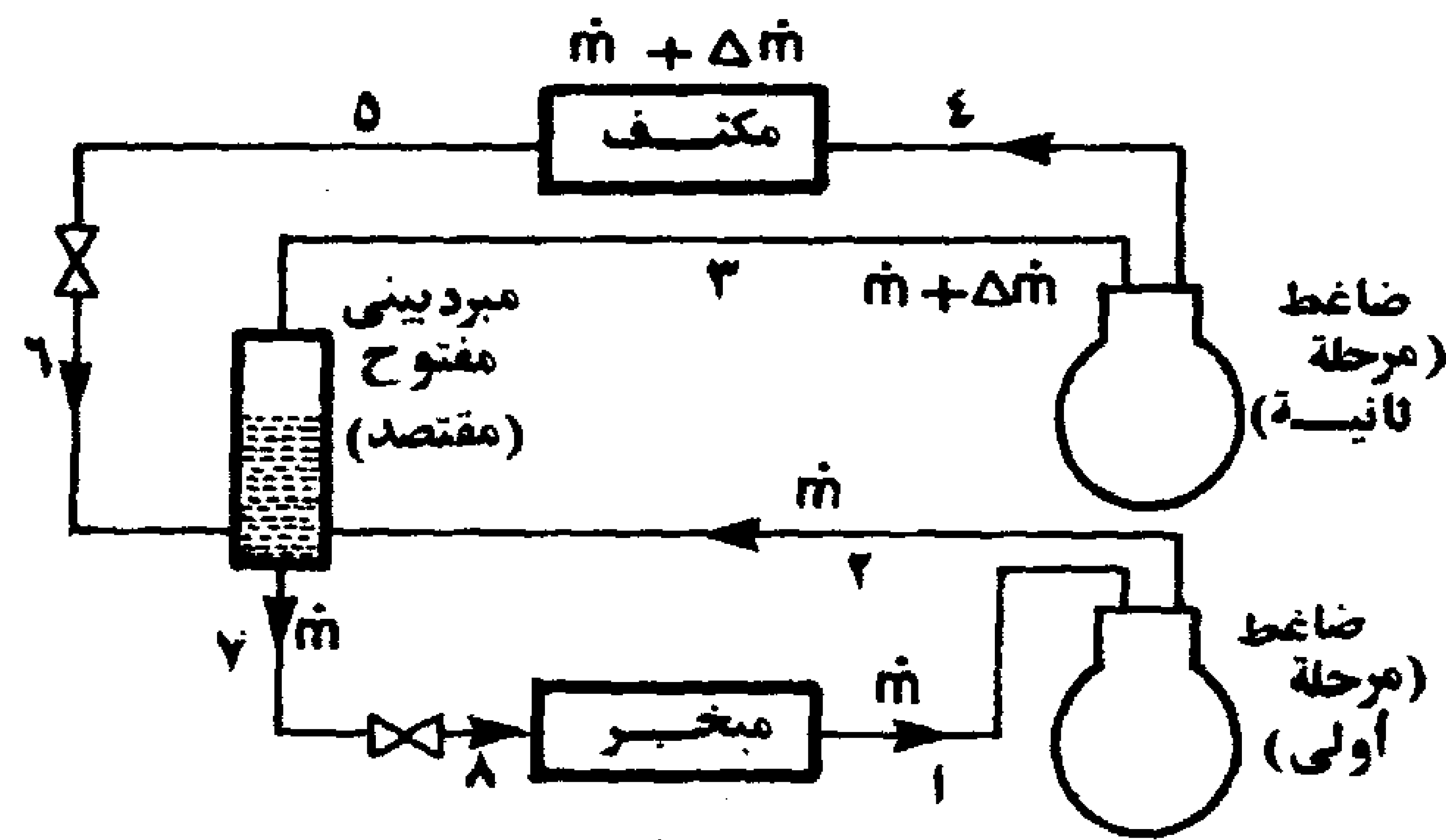
وهي أيضًا أقل من القيمة المعطاة بجدول ٨,٢ لمرحلة واحدة (أي أقل من ١,٦٢)، مما يعني أن استخدام نظام ثنائي المرحلة بمبرد بيني يقلل الحرارة المطرودة بالمكثف مقارنة بنظام أحادي المرحلة.

٨,٣,٢ المبرد البيني المفتوح

يوضح شكل ٨,٥ نظام تبريد ثنائي المرحلة يحوي مبردًا بينيًا مفتوحًا (مقتصد). وينتج عن استخدام المبرد البيني تبريد بخار المبرد من الحالة ٢ إلى الحالة ٣، بالإضافة إلى تبريد سائل المبرد من الحالة ٥ إلى الحالة ٧ مما يزيد التأثير التبريدي للمبخر. وبالمثل لحالة المبرد البيني المغلق، فإن الاتزان الحراري للمبرد البيني المفتوح يعطى بالعلاقة الآتية:

$$\frac{\Delta\dot{m}}{\dot{m}} = \frac{(h_5-h_7)+(h_2-h_3)}{(h_3-h_5)} \qquad (8.13)$$





شكل ٨,٥ نظام تبريد ثنائي المرحلة يحوي مبردًا بينيًا مفتوحًا (مقتصد).

وهي نفس العلاقة السابقة للمبرد البيني المغلق مع ملاحظة أن التبريد التحتي في حالة المبرد البيني المفتوح يساوي التبريد التحتي للحالة المثالية للمبرد البيني المغلق، أي عندما تساوي T_7 درجة الحرارة T_3. ويحسب الشغل بمرحلتي الضاغط بنفس المعادلة السابقة لحالة استخدام المبرد البيني المغلق.

ويجب أن يوضع المبرد البيني المفتوح أقرب ما يمكن إلى المبخر مع عزله حراريًا للحد من انتقال الحرارة من الجو المحيط إلى سائل المبرد الساري إلى صمام التمدد، ولخفض فقد الضغط خلال خطوط المبرد الواصلة إلى صمام التمدد، حيث يعمل انتقال الحرارة وفقد الضغط على تبخير جزء من سائل المبرد

قبل الدخول إلى صمام التمدد، مما يؤدي إلى خلل في أداء الصمام وتلفه في بعض الأحيان، كما بينا سابقًا. أما إذا تعذر وضع المبرد البيني المفتوح بالقرب من المبخر، فيلزم عندئذ إيجاد وسيلة لتبريد سائل المبرد تحتيًا، مثل استخدام مبادل حراري (كما قدمنا سابقًا) لمنع تبخر سائل المبرد قبل دخول صمام التمدد.

مثال ٨,٣

أعد حل مثال ٨,٢ باستخدام شكل ٨,٥، وبفرض حالة التشبع للحالات ١ و٣ و٥ و٧.

الحل

يعطي جدول ٨,٣ هنا أيضًا خواص مبرد ٢٢ عند الحالات المختلفة بشكل ٨,٥ ماعدا إنثالبي نقطتي ٧ و٨، ودرجة حرارة نقطة ٧. وتعطي إنثالبي نقطتي ٨ و٧ كما يلي:

$$h_7 = h_8 = 200 \quad \text{kJ/kg}$$

أ) أقصى درجة حرارة هي ٧٢°م وتحدث عند الحالة ٤.

ب) بتكرار نفس الخطوات بمثال ٨,٢ ينتج الآتي:

$$\dot{m} = 0.00531 \quad \text{kg/s}$$

$$\Delta\dot{m} = 0.593 * 0.00531 = 0.00315 \quad \text{kg/s}$$

$$\text{COP} = \frac{1}{0.00531(425.9 - 388.1) + 0.00847(439.3 - 405)} = 2.04$$

أي إن معامل الأداء للنظام قد تحسن باستخدام مبرد بيني مفتوح مقارنة باستخدام مبرد بيني مغلق.

ج) باتباع نفس خطوات المثال السابق ينتج أن:

$$\text{HRF} = 0.00847(439.3 - 263.2) = 1.49\ \text{kW}$$

ويلاحظ أيضًا انخفاض معدل الحرارة المطرودة من المكثف باستخدام مبرد بيني مفتوح بدلا من المبرد البيني المغلق.

٨,٣,٣ مبرد المياه البيني

تستخدم بعض النظم ثنائية المرحلة (أو متعددة المراحل) أيضًا مبرد مياه بيني لتبريد بخار المبرد قبل الدخول إلى المبرد البيني المفتوح أو المغلق، أو قبل الدخول إلى المرحلة التالية مباشرة. ويعمل مبرد المياه على تحسين أداء نظام التبريد نظرًا لخفض قيمة $\Delta\dot{m}$ بالنظام، وبالتالي خفض قدرة الانضغاط بالمرحلة الثانية بالضاغط، مما يؤدي إلى تحسين معامل أداء النظام. ويلزم لاستخدام هذا المبرد أن تزيد درجة حرارة بخار المبرد عند النقطة ٢ عن درجة حرارة مياه التبريد بقدر محسوس، وإن كان هذا الشرط لا يتوفر في أحوال كثيرة، مما يمنع استخدام مبرد المياه البيني. ويوضح شكل ٨,٦ نظام تبريد ثنائي المرحلة يحوي مبرد مياه بيني بالإضافة إلى مبرد بيني مفتوح. ويعطى الاتزان الحراري للمبرد البيني المفتوح بالعلاقة التالية:

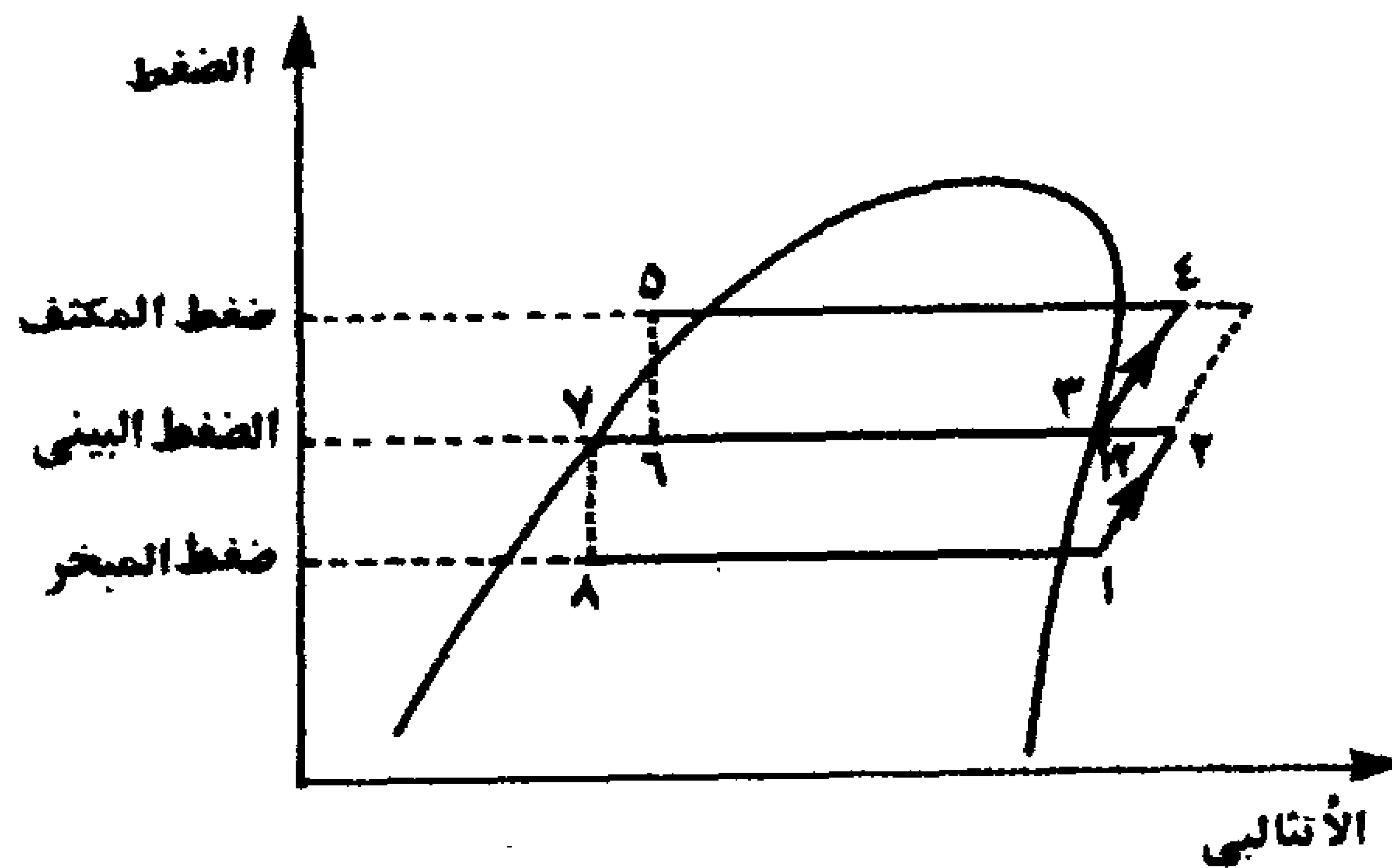
$$\frac{\Delta\dot{m}}{\dot{m}} = \frac{(h_5 - h_7) + (h_{2A} - h_3)}{(h_3 - h_5)} \qquad (8.14)$$

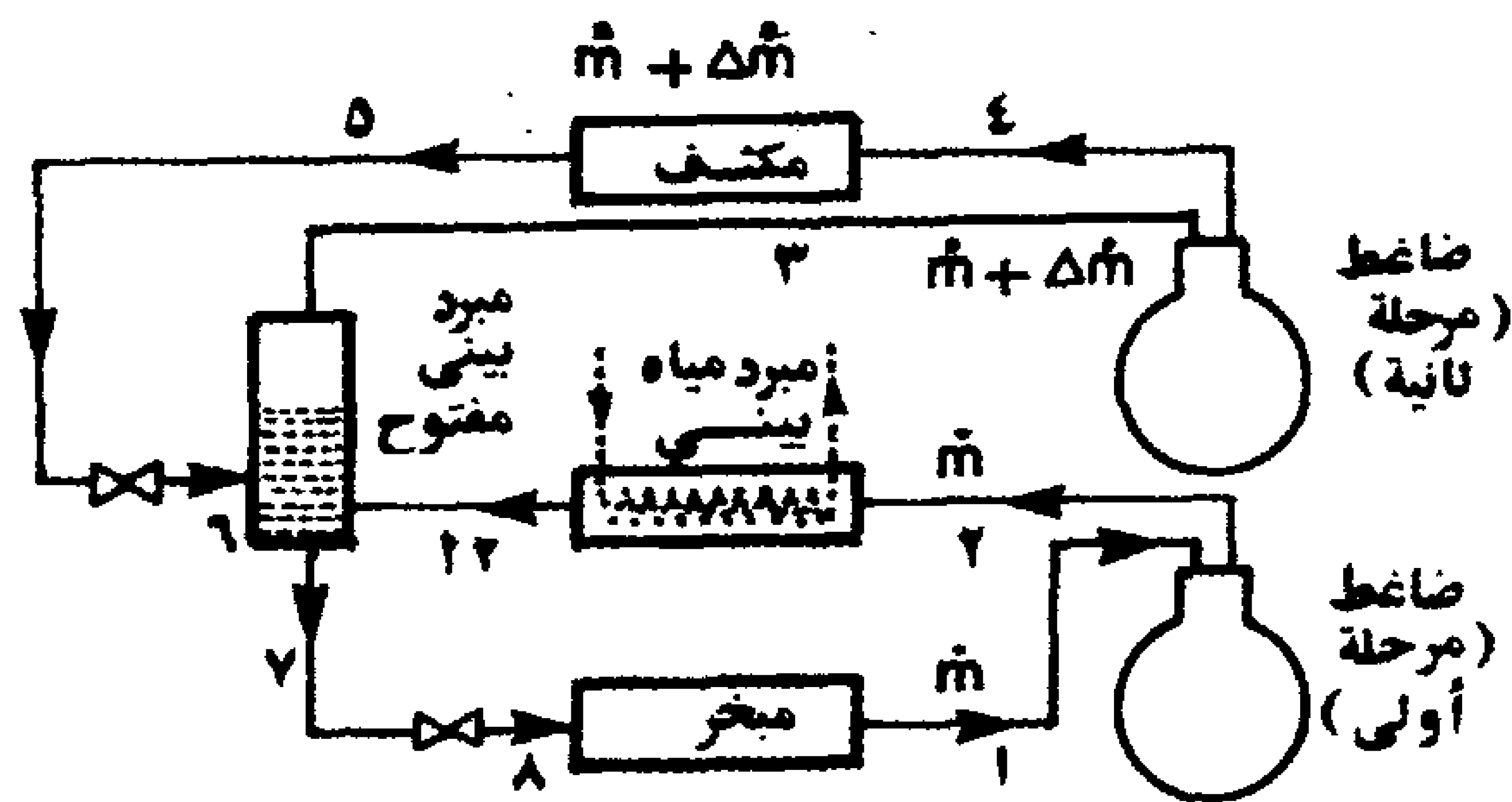
وتعتمد درجة الحرارة T_{2A} على الفعالية ε لمبرد المياه (المبادل الحراري) المستخدم ودرجة الحرارة T_{wi} لدخول مياه التبريد إلى مبرد المياه. فبفرض مبرد مياه بسريانات مضادة، كما هو مبين بالشكل، فإن درجة الحرارة T_{2A} تكون:

$$T_{2A} = T_2 - \varepsilon(T_2 - T_{wi}) \qquad (8.15)$$

عندئذ تحسب الحرارة المطرودة في مبرد المياه البيني كما يلي:

$$\dot{Q}_w = \dot{m}(h_2 - h_{2A}) \tag{8.16}$$





شكل ٨,٦ نظام تبريد ثنائي المرحلة يحوي مبرد مياه بيني ومبرد بيني مفتوح.

٨,٣,٤ عدد المراحل والضغط البيني في النظم متعددة المراحل

من المهم أن يعرف مهندس التبريد متى يُفضل أن يكون نظام التبريد أحادي المرحلة أو ثنائي المرحلة، أو ثلاثي المرحلة، لأنه بالرغم من تحسين أداء نظام التبريد بزيادة عدد المراحل إلا أن التكلفة الأولية للنظام تزيد بالطبع بزيادة هذا العدد. ولقد أورد ثريلكيلد في كتابه (Threlkeld 1970, 1998) أنه لمبردات ١٢ و ٢٢ والأمونيا يفضل استخدام النظم وحيدة المرحلة إذا زادت درجة حرارة المبخر عن حوالي -٢٩°م، أما إذا تراوحت درجة حرارة المبخر بين -٦٠ و -٣٠°م فيفضل استخدام مرحلتين بعملية الانضغاط، فإذا قلّت درجة حرارة المبخر عن -٦٠°م يفضل استخدام ثلاث مراحل بالضاغط. ويعتمد الحد الأدنى المسموح به لدرجة حرارة المبخر في نظم التبريد متعددة المراحل على

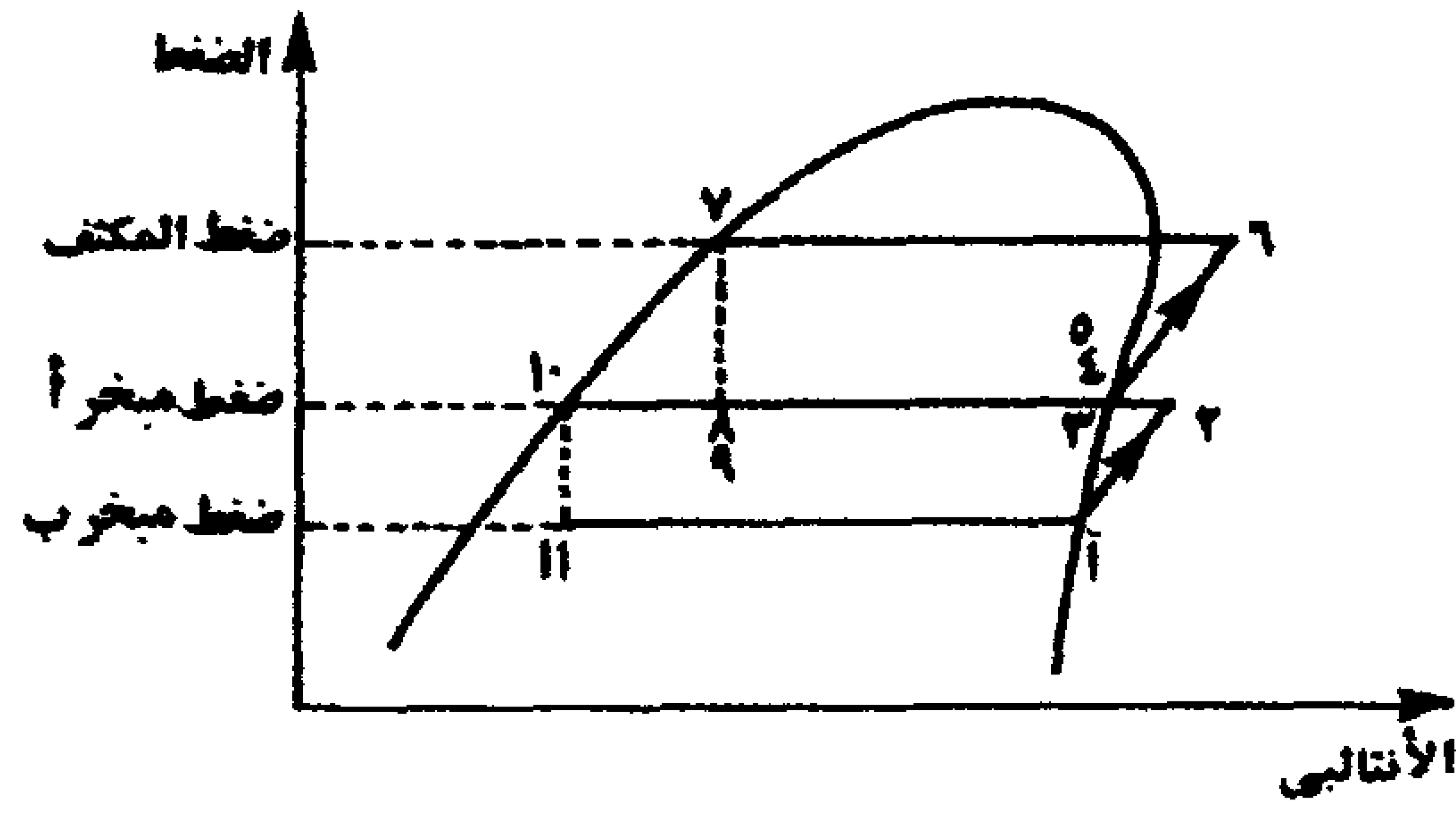
خواص المبرد المستخدم بها. ولقد أورد ثريلكيلد، أيضًا، أن الحد الأدنى لدرجة حرارة المبخر للنظم ثلاثية المرحلة هي -٧٦°م للأمونيا، و-٧٨°م لمبرد ١٢ و-٨٦°م لمبرد ٢٢.

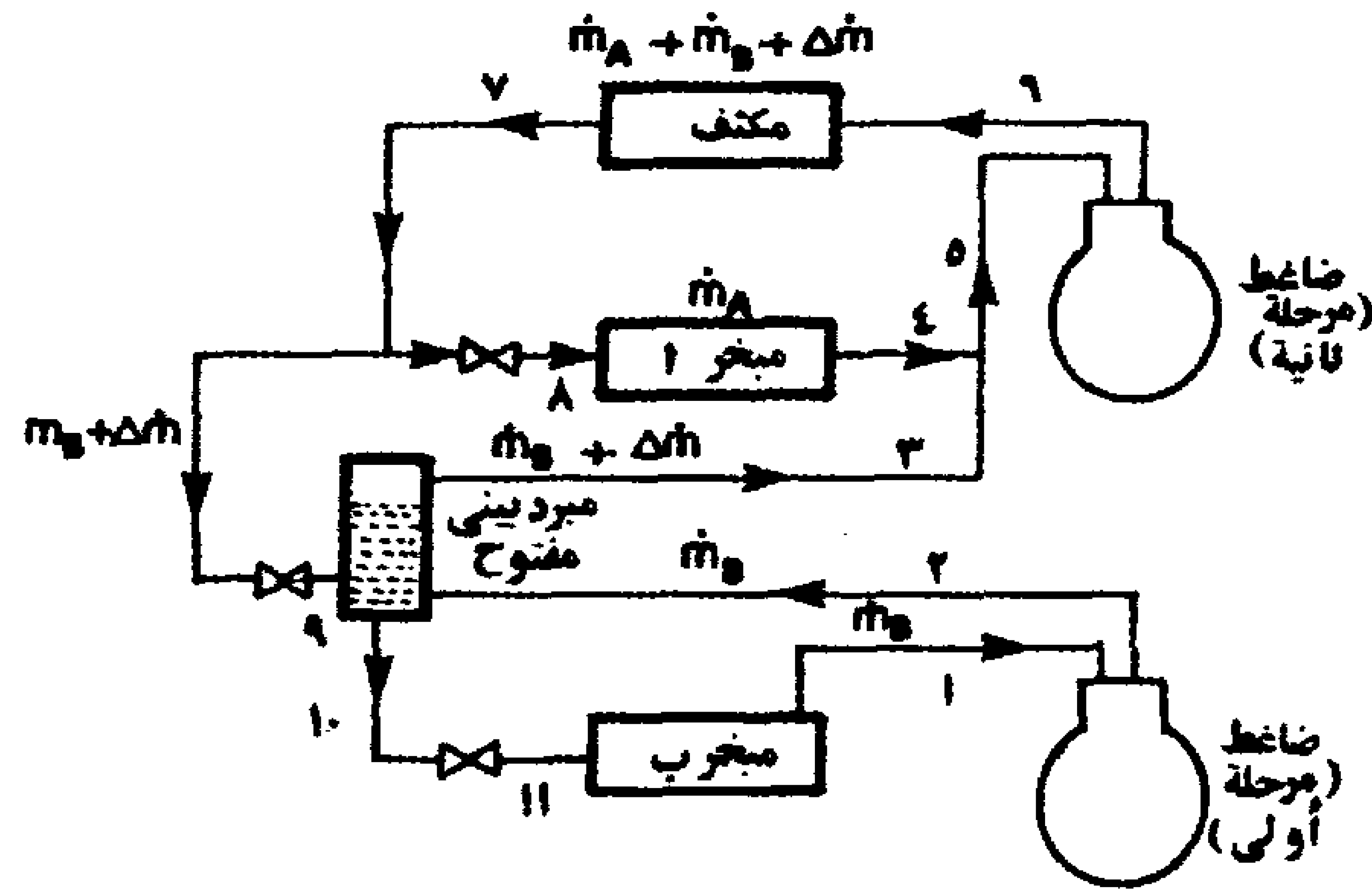
ولا يمكن الأخذ بالتقسيم السابق لتعدد المراحل الذي أورده ثريلكيلد كحد فاصل في جميع الأحوال، حيث يكون نوع التطبيق المستخدم سببًا مهمًا لتحديد عدد المراحل المستخدمة، بدلا من درجة حرارة المبخر، كما بينا سابقًا. فمثلا، إذا كان هناك نظام به مبخران يعملان عند درجتي حرارة تزيد أحدهما عن الأخرى بقدر محسوس، فقد يكون من الأفضل اقتصاديًا (من حيث تكلفة التشغيل) أن يكون نظام التبريد ثنائي المرحلة، بالرغم من ارتفاع درجة حرارة كل مبخر عن -٢٩°م (وهي الدرجة التي أوردها ثريلكيلد لاستخدام مرحلتين بدلا من مرحلة واحدة). ويبين شكل ٨,٧ واحدًا من هذه النظم.

ولقد أجريت العديد من الأبحاث لدراسة أفضل قيمة للضغط البيني للنظم متعددة المراحل. ولقد أورد دوسات (Dossat 1981) وآشري (ASHRAE 1990) أن أفضل نسبة للضغط في كل مرحلة من مراحل النظام المستخدم يجب أن تعطى كما يلي:

$$r = \sqrt[i]{P_c / P_e} \qquad (8.17)$$

حيث P_c و P_e هما على التوالي ضغط المكثف وضغط المبخر، و i هي عدد المراحل بالنظام أي ٢ أو ٣. إلا أن هذه النسبة لا تكون هي النسبة المستخدمة في بعض النظم لأسباب عملية متعددة. فمثلا إذا حوى نظام ثنائي المرحلة مبخرين عند درجتي حرارة مختلفتين، فيفضل عندئذ أن يكون الضغط البيني مناظرًا لضغط المبخر عالي درجة الحرارة، كما هو الحال في شكل ٨,٧.





شكل ٨,٧ نظام تبريد ثنائي المبخر، ثنائي المرحلة يحوي مبردا بينيا مفتوحا.

أيضًا، قد تحدد مواصفات ضاغط المرحلة الأولى ذات الضغط المنخفض، بينما تعمل أسطوانة واحدة فقط في المرحلة الثانية ذات الضغط المرتفع، وبفرض نظام تبريد يماثل النظام المبين بشكل ٨,٥ فإن الضغط البيني الناتج من اتزان تشغيل المرحلة الأولى مع المرحلة الثانية بالضاغط يمكن الحصول عليه من حل المعادلتين اللاخطيتين الآتيتين:

$$\dot{m}=\frac{3}{4v_1}\overline{PD}\eta_{v1} \qquad (8.18)$$

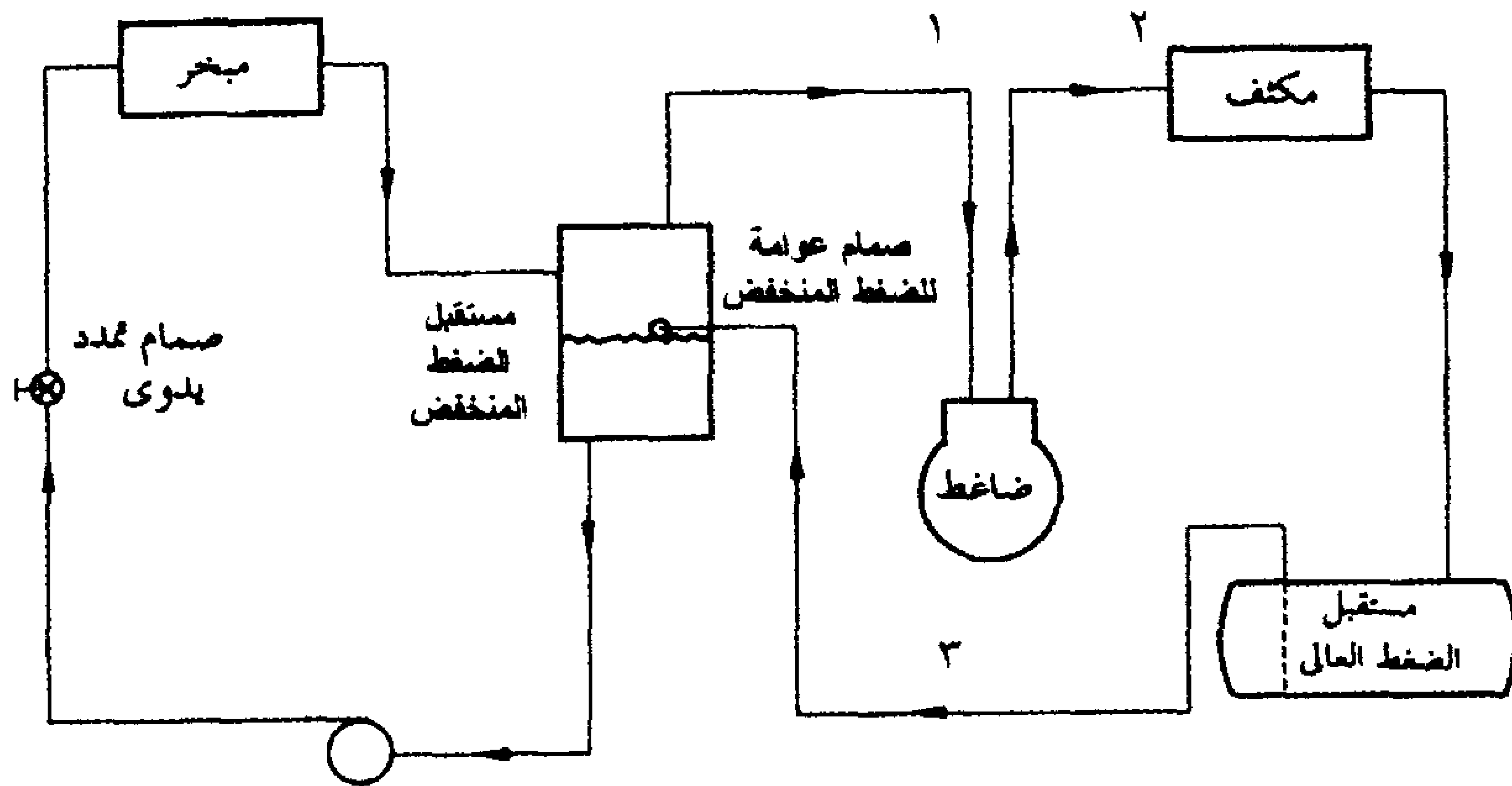
$$\dot{m}+\Delta\dot{m}=\frac{1}{4v_3}\overline{PD}\eta_{v2} \qquad (8.19)$$

حيث $\overline{PD}$ هي إزاحة الكباس النظرية للضاغط، و η_{v1} و η_{v2} هما الكفاءة الحجمية للضاغط الترددي بالمرحلة الأولى والمرحلة الثانية على التوالي، وv هي الحجم

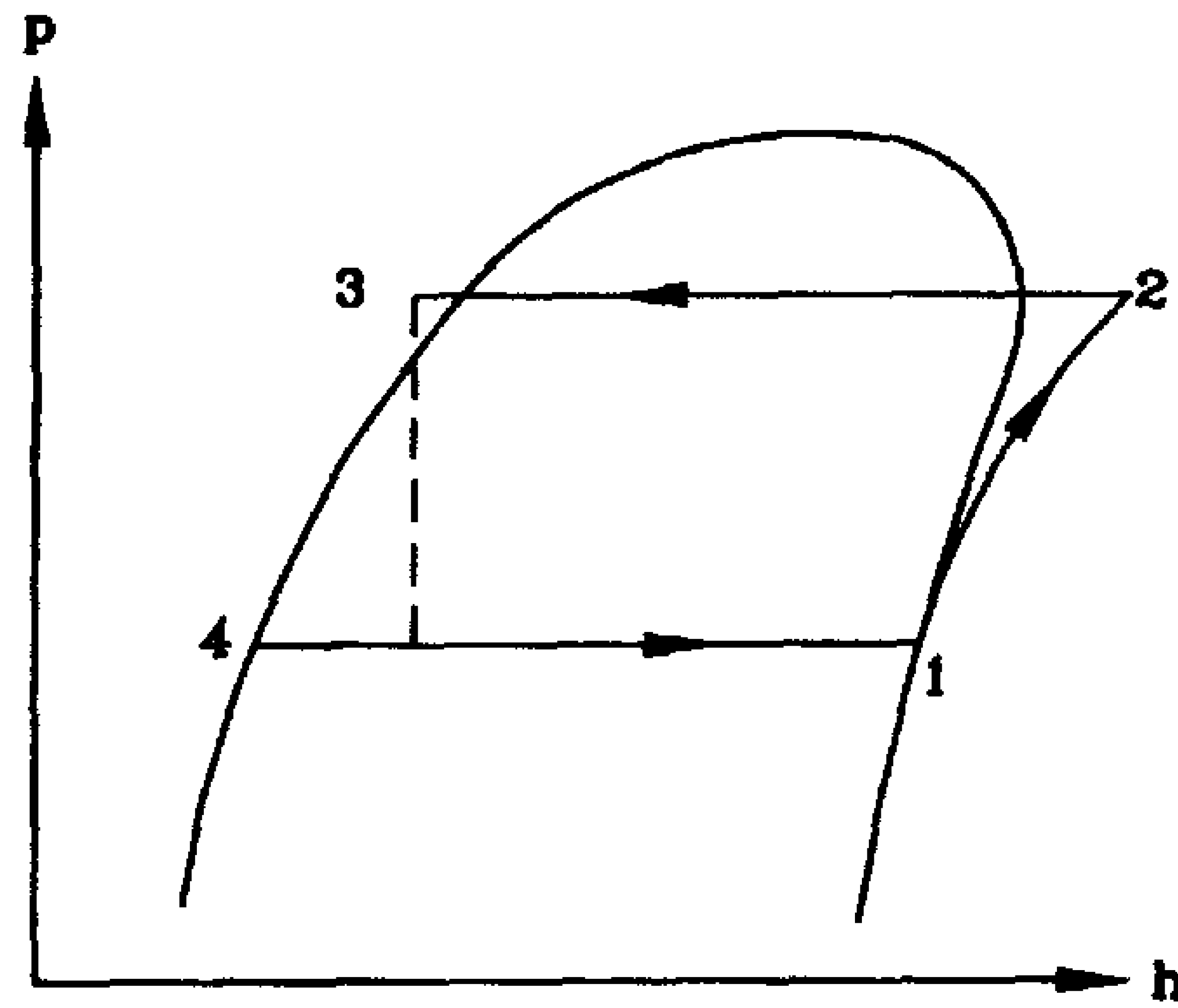
النوعي لبخار المبرد عند الحالة المعنية. ولمزيد من التفاصيل عن حسابات الضاغط الترددي، يمكن للقارئ الرجوع إلى الفصل الثالث عشر من الكتاب الحالي.

٨,٤ نظم التغذية الزائدة للسائل

في هذه النظم يغذى المبخر بسائل المبرد بمعدل يزيد عن معدل التبخير اللازم للحمل الحراري بالمبخر، مما يحسن عملية انتقال الحرارة بدرجة ملحوظة. ويتكون هذا النظام كما هو مبين بشكل ٨,٨ من المكونات الأساسية لدورة التبريد، وهى المكثف والضاغط والمبخر وصمام التمدد، بالإضافة إلى مستقبل لحفظ سائل المبرد عند الضغط العالي (ضغط المكثف)، ومستقبل آخر لحفظ سائل المبرد عند الضغط المنخفض (ضغط المبخر)، ومضخة ميكانيكية لتغذية سائل المبرد إلى المبخر. ويستخدم كما هو موضح بالشكل صمام عوامة للضغط المنخفض لخفض ضغط المبرد من ضغط المكثف بمستقبل الضغط العالي إلى ضغط المبخر بمستقبل الضغط المنخفض. ويوضح شكل ٨,٩ تمثيل العمليات المختلفة لنظام التبريد على خريطة الضغط- الإنثالبي للمبرد.



شكل٨,٨ نظام تغذية زائدة للسائل باستخدام مضخة ميكانيكية.



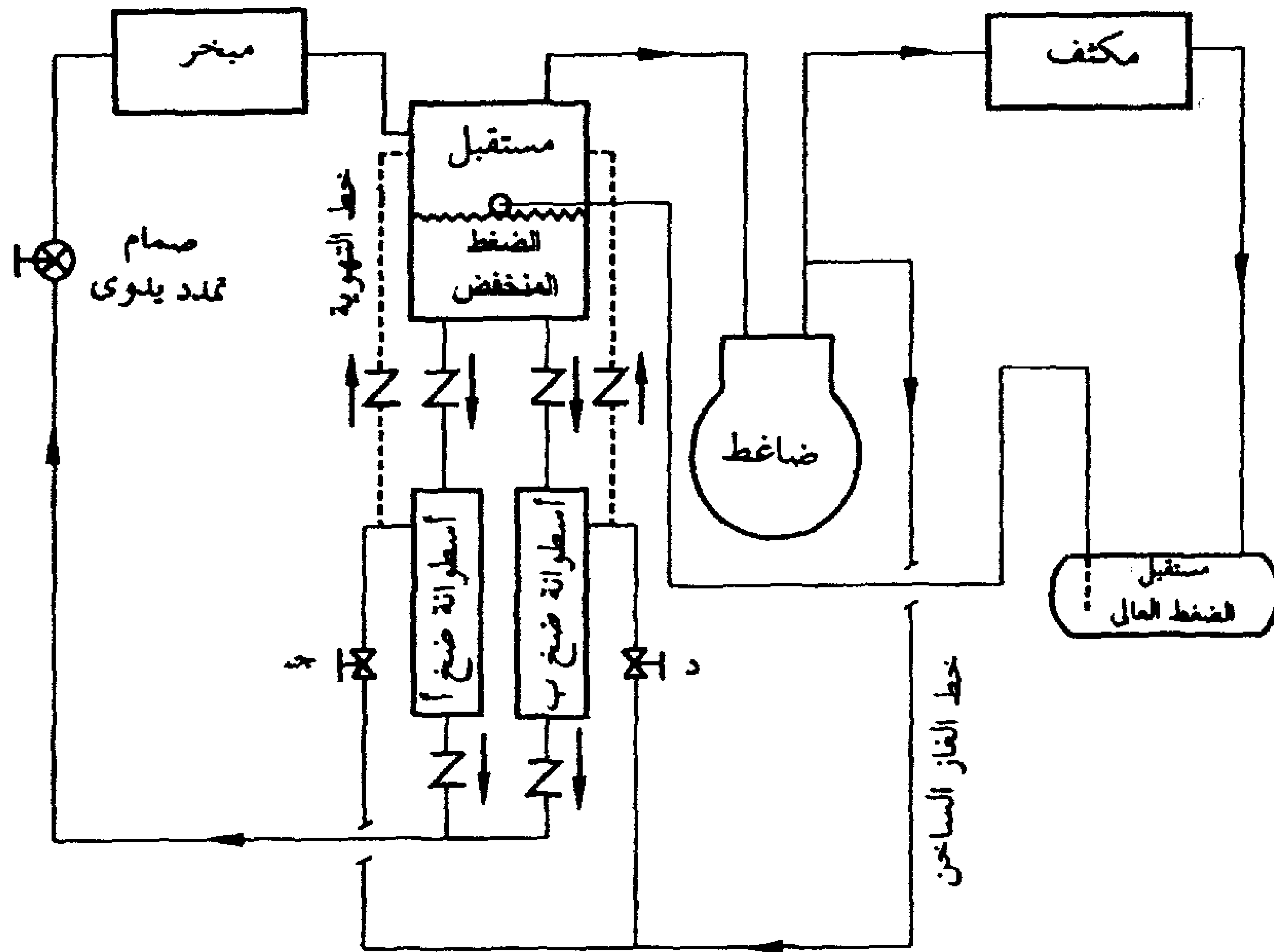
شكل٨,٩ دورة التبريد لنظام تغذية زائدة للسائل (انظر شكل٨,٨).

ويمتاز نظام التغذية الزائدة للسائل، بالإضافة إلى تحسين عملية انتقال الحرارة، بميزات أخرى عديدة، منها حماية الضاغط من احتمال دخول سائل إليه، حيث يعمل مستقبل الضغط المنخفض على فصل السائل عن البخار قبل سحب البخار إلى بالضاغط (انظر الشكل ٨,٨). أيضًا يعمل النظام الحالي بفرق ضئيل للتحميص، مما يوفر في استهلاك الطاقة في عملية الانضغاط، وكذلك يقلل من درجة حرارة الغاز الساخن الخارج من الضاغط، مما يساعد على اختيار مكثف ذي سطح أصغر نسبيًا مقارنة بالمكثفات التي تعمل بالنظم الأخرى عند نفس الظروف. ويؤدي انخفاض درجة حرارة الغاز الساخن الخارج من الضاغط أيضًا إلى حماية زيت تزييت الضاغط من التحلل. أيضًا، يمتاز النظام الحالي للتغذية الزائدة للسائل بعدم السماح لبخار المبرد الناتج من عملية خفض الضغط من الضغط العالي إلى الضغط المنخفض، من دخول المبخر، حيث يعمل هذا البخار على خفض معدل انتقال الحرارة بالمبخر إذا دخل إليه. ومن المميزات الأخرى، أن تذبذب درجة حرارة الجو المحيط لا يؤثر على معدل التبريد الذي يعطيه المبخر خلافًا لما هي عليه العادة في النظم الأخرى.

أما أهم عيوب نظام التغذية الزائدة فهي احتياجه إلى شحنة كبيرة من المبرد مقارنة بالنظم الأخرى، هذا بالطبع بالإضافة إلى ارتفاع التكلفة الأولية اللازمة لشراء المضخة وتركيبها وصيانتها، وكذلك التكلفة الإضافية نتيجة تركيب خطوط السائل بين المبخر ومستقبل الضغط المنخفض، وتكلفة عزل هذه الخطوط.

وتلزم الإشارة هنا أن اقتصاديات نظم التبريد بالتغذية الزائدة للسائل تكون أفضل من اقتصاديات نظم التبريد الأخرى في حالة النظم الكبيرة، أي النظم ذات الأحمال الكبيرة للتبريد. بينما يكون العكس صحيحًا، أي تقل اقتصاديات نظم التبريد بالتغذية الزائدة للسائل عن اقتصاديات النظم الأخرى في حالة النظم الصغيرة.

ويمكن الاستعاضة عن المضخة الميكانيكية لتغذية المبخر بسائل المبرد باستخدام ضخ الغاز، وفي هذا النظام يستخدم الغاز الساخن المضغوط بالضاغط لهذا الغرض. فكما هو مبين بشكل ٨,١٠، يضم النظام أسطوانتين للضخ، أحدهما " أ " والأخرى "ب". بفتح الصمام " ج " يتجه الغاز الساخن القادم من الضاغط إلى الأسطوانة "أ"، ثم يعمل هذا الغاز على ضخ سائل المبرد بالأسطوانة "أ" إلى المبخر، في هذه الأثناء تملئ الأسطوانة "ب" بالسائل من مستقبل الضغط المنخفض ويتجه البخار الموجود بالأسطوانة إلى مستقبل الضغط المنخفض خلال خط التهوية. عندما يتم إفراغ الأسطوانة "أ" من السائل، يقفل الصمام "ج" ويفتح الصمام "د" تلقائيًا، فيتجه الغاز الساخن إلى الأسطوانة "ب" لضخ السائل بها إلى المبخر، بينما تملئ الأسطوانة "أ" بسائل المبرد من مستقبل الضغط المنخفض، وهكذا.



شكل١٠,٨ نظام تغذية زائدة للسائل باستخدام ضخ الغاز.

٨,٤,١ حساب معدل دوران السائل

يعرف معدل دوران السائل R في منظم التغذية الزائدة بأنه نسبة معدل سريان كتلة سائل المبرد للمبخر $\dot{m}_l$ ، إلى معدل المبرد الذي يتم تبخيره في المبخر $\dot{m}_v$، أي أن:

$$R=\frac{\dot{m}_l}{\dot{m}_v}=\frac{\dot{m}_l h_{fg}}{\dot{Q}_l} \qquad (8.20)$$

حيث $\dot{Q}_l$ هي حمل التبريد في المبخر و h_{fg} هي الحرارة الكامنة للتبخير عند درجة حرارة المبخر. ويلاحظ أنه توجد قيمة مثلى لمعدل الدوران R. وتعتمد هذه القيمة على درجة حرارة المبخر وحمل التبريد به وظروف التشغيل بالمبخر. فإذا زاد معدل الدوران R عن القيمة المثلى له زادت تكلفة ضخ سائل المبرد دون فائدة حقيقية في تحسين قيمة معامل انتقال الحرارة. أما إذا قلت

قيمة R عن هذه القيمة المثلى، قل معامل انتقال الحرارة بين المبرد داخل المبخر والحمل الحراري له. ويبين جدول ٨,٤ القيمة الموصى بها لمعدل الدوران R للأمونيا (مبرد ٧١٧) ولمبرد ٥٠٢ ولمبرد ٢٢. وتحسب قيمة h_{fg} من جداول التشبع للمبرد المستخدم (انظر ملحق أ)، وعليه يحسب معدل سريان سائل المبرد إلى المبخر كما يلي:

$$\dot{m}_l = \frac{\dot{Q}_l}{h_{fg}} R \qquad (8.21)$$

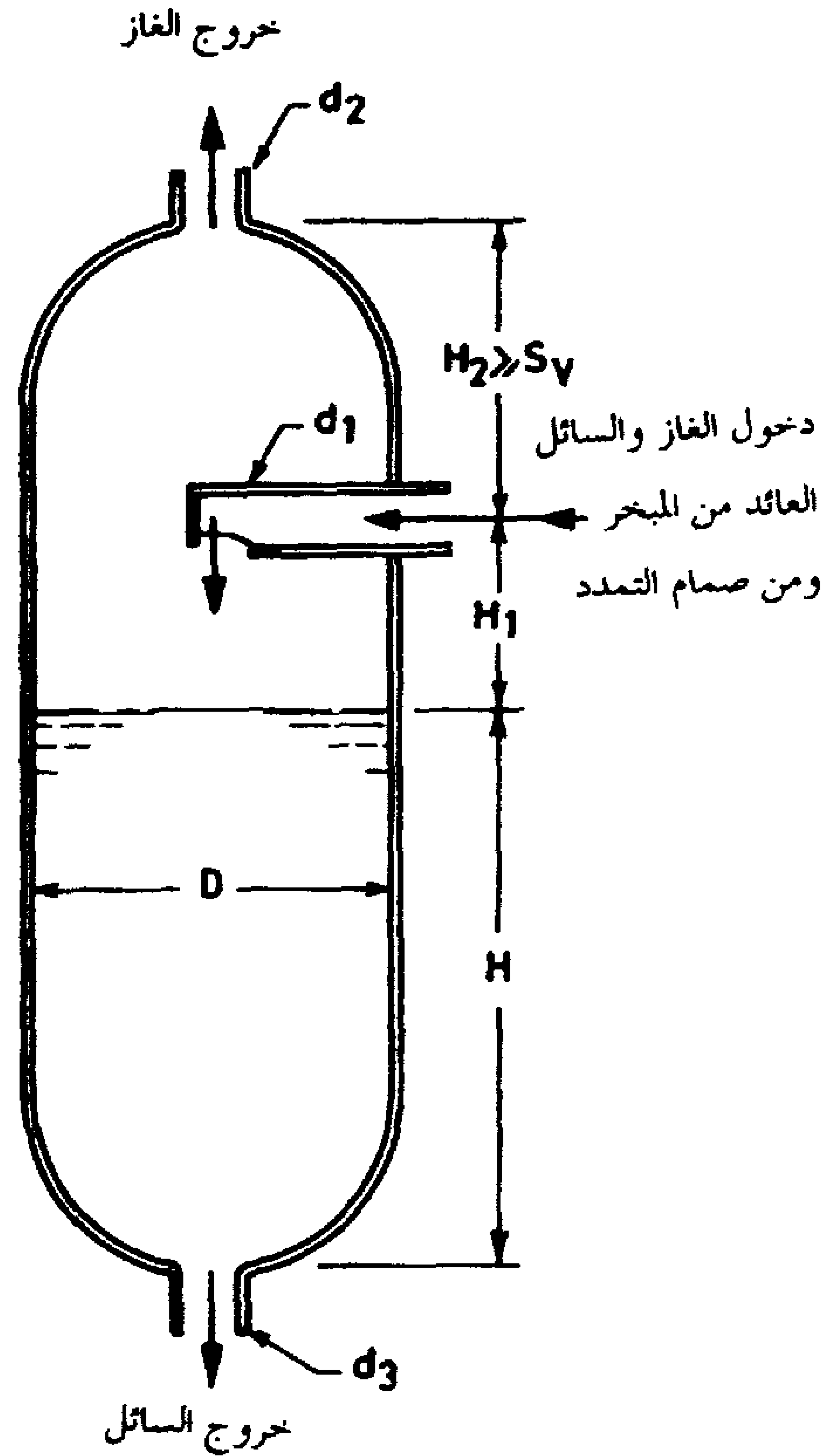
جدول ٨,٤ القيمة الموصى بها لمعدل دوران السائل (ASHRAE 1994).

المبرد	الحد الأدنى لمعدل دوران السائل
أمونيا (مبرد ٧١٧): تغذية رأسية لأسفل	٦ إلى ٧
أمونيا (مبرد ٧١٧): تغذية رأسية لأعلى	٢ إلى ٤
مبرد ٥٠٢ – تغذية رأسية لأعلى	٢
مبرد ٢٢ تغذية رأسية لأعلى	٣

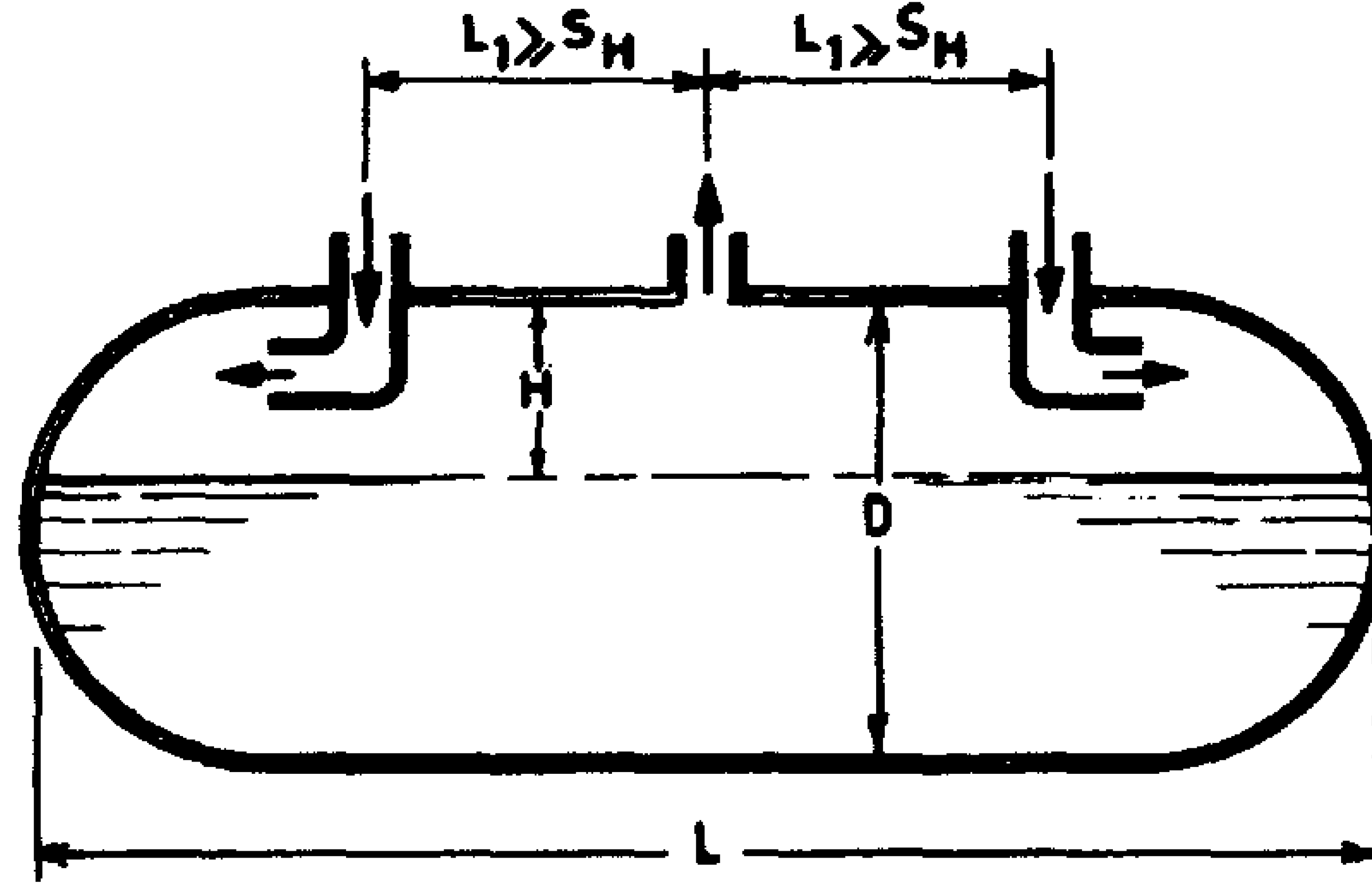
٨,٤,٢ تصميم مستقبل السائل للضغط المنخفض

كما بينا بشكل ٨,٨ تعمل نظم التغذية الزائدة للسائل بمستقبل للسائل عند الضغط المنخفض. ويستخدم هذا المستقبل لتخزين سائل المبرد، وكذلك لفصل بخار المبرد عن السائل قبل تغذيته إلى المبخر. ويجب أن تكفي سعة هذا المستقبل لحفظ الحجم اللازم من سائل المبرد، واستيعاب أي زيادة في حجم هذا السائل نتيجة تذبذب حمل التبريد أثناء التشغيل، بالإضافة إلى زيادة هذا الحجم نتيجة الرغاوي المصاحبة لعملية التبخير بسبب التمدد الفجائي لخفض الضغط ودرجة الحرارة عند دخول المبرد إلى المستقبل خلال صمام التمدد.

يصمم المستقبل بشكل رأسي أو شكل أفقي كما هو مبين بشكلي٨,١١ و٨,١٢. ويُفَضل بين الشكلين - الرأسي والأفقي - تبعا للحيز المتاح للمستقبل في موقع التثبيت. ويعتمد تصميم المستقبل الرأسي أو الأفقي على مدة الوقت الذي يقضيه بخار المبرد في المستقبل وهو ما يعرف بزمن البقاء. فكلما زاد زمن البقاء لبخار المبرد داخل المستقبل، كلما تمكن السائل المصاحب له بالانفصال والترسب في قاع المستقبل. وبالمثل، كلما قل هذا الزمن كلما زاد مقدار السائل المسحوب (المحمول) بالبخار إلى خارج المستقبل.



شكل ٨,١١ رسم تخطيطي لمستقبل رأسي لفصل الغاز والسائل [ASHRAE 1989].



شكل٨,١٢ رسم تخطيطي لمستقبل أفقي لفصل السائل [ASHRAE 1989].

يعتمد زمن البقاء لبخار المبرد في المستقبل الرأسي على سرعة البخار u داخل المستقبل، والمسافة الرأسية لفصل البخار S_v بين نقطة دخول البخار إلى المستقبل ونقطة خروجه منه. وللحصول على زمن بقاء مناسب تأخذ المسافة S_v تبعًا لقيمة u. فكلما قلت u صغرت قيمة S_v والعكس بالعكس. ويعطي جدول ٨,٥ الحد الأقصى لسرعة البخار u لعدة مبردات لقيم مختلفة للمسافة الرأسية S_v، عند درجات حرارة مختلفة بالمستقبل الرأسي.

باختيار قيمة السرعة u والمسافة S_v من الجدول، يمكن تحديد الأبعاد المختلفة للمستقبل الرأسي المعطى بشكل ٨,١١ [ASHRAE 1994]. فتعطى المسافة H_1 (مم) كما يلي:

$$H_1=\sqrt{51\dot{V}/u} \tag{8.22}$$

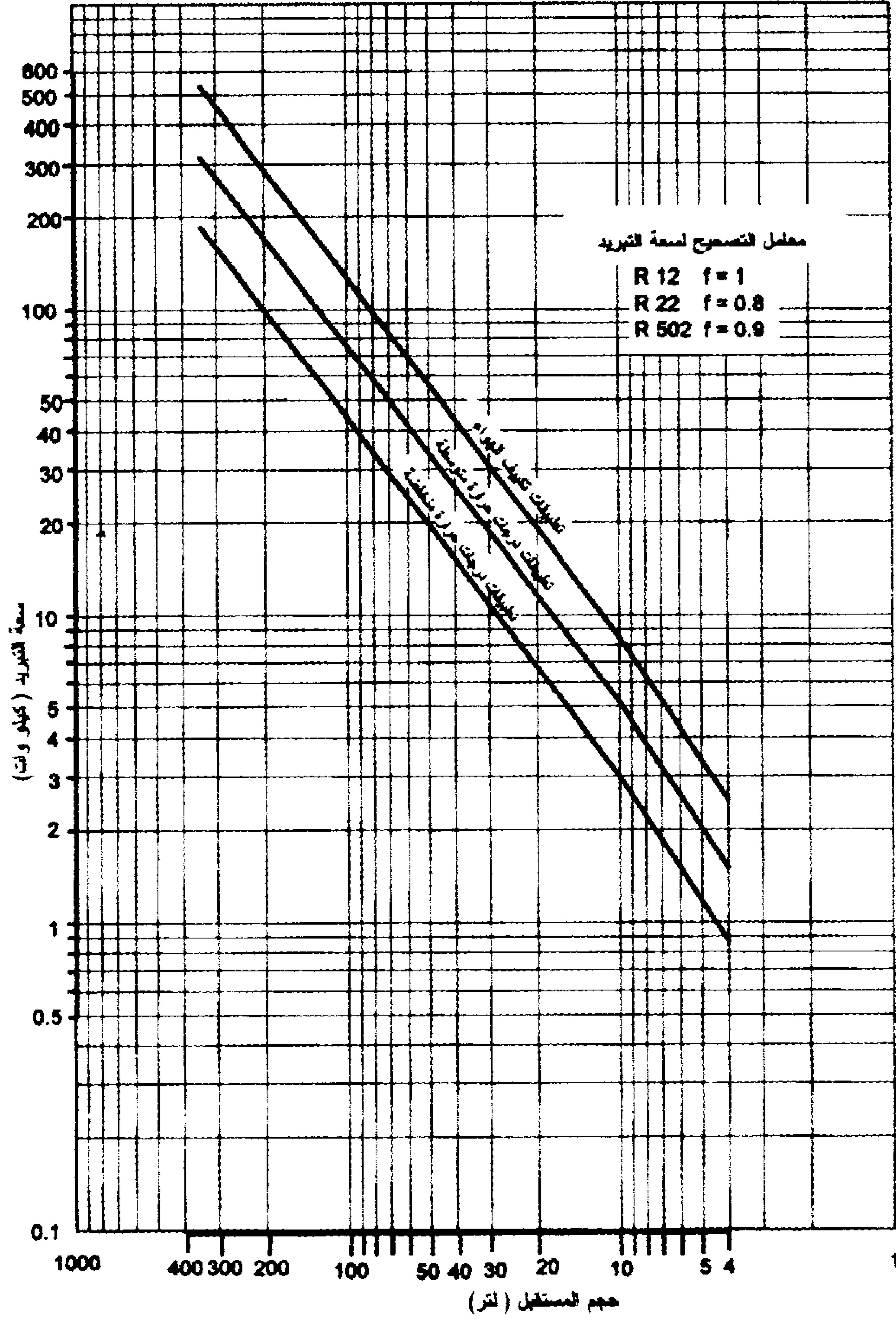
حيث u بالمتر/ث و $\dot{V}$ هي أقصى معدل لسريان البخار إلى المستقبل (لتر/ث). ويقدر قطر المستقبل D (مم) كما يلي:

$$D=\sqrt{1270\dot{V}/u} \tag{8.23}$$

حيث u و $\dot{V}$ بنفس الوحدات المعطاة عاليه. وتقدر قيمة الارتفاع H تبعًا للحد الأقصى لشحنة المبرد المتوقع وجودها بالمستقبل في أي وقت أثناء التشغيل أو الإيقاف. وتأخذ النسبة L/D (حيث L هي الطول الكلي للمستقبل) عادة بين ١ إلى ١٠ ، وإن كان يفضل أن تكون من ٣ إلى ٥ لأسباب اقتصادية.

جدول ٨,٥ الحد الأقصى لسرعة البخار عند حالة الاستقرار لضمان عدم حمل سائل المبرد مع البخار الخارج من المستقبل، عند قيمة مختلفة للمسافة الرأسية S_v [ASHRAE 1994].

درجة حرارة	المسافة الرأسية S_v	السرعة القصوى للبخار، م/ث			
°م	مم	أمونيا	مبرد ٢٢	مبرد ١٢	مبرد ٥٠٢
+١٠	٢٥٠	٠,١٥	٠,٠٧	٠,٠٨	٠,٠٦
	٦١٠	٠,٦٤	٠,٣١	٠,٣٦	٠,٢٥
	٩١٠	٠,٧١	٠,٣٩	٠,٤٣	٠,٣٢
−٧	٢٥٠	٠,٢١	٠,١٠	٠,١١	٠,٠٨
	٦١٠	٠,٨٧	٠,٤٤	٠,٤٩	٠,٣٥
	٩١٠	٠,٩٩	٠,٥٢	٠,٥٨	٠,٤٢
−٢٣	٢٥٠	٠,٣١	٠,١٤	٠,١٦	٠,١١
	٦١٠	١,٢٩	٠,٦١	٠,٦٩	٠,٤٩
	٩١٠	١,٤٣	٠,٧٢	٠,٨١	٠,٥٩
−٤٠	٢٥٠	٠,٤٨	٠,٢١	٠,٢٤	٠,١٧
	٦١٠	١,٩٩	٠,٨٨	١,٠١	٠,٧١
	٩١٠	٢,١٧	١,٠٤	١,١٧	٠,٨٤
−٥٧	٢٥٠	٠,٨٠	٠,٣٣	٠,٣٧	٠,٢٥
	٦١٠	٣,٣٠	١,٣٦	١,٥٤	١,٠٨
	٩١٠	٣,٥٤	١,٥٧	١,٧٨	١,٢٥



شكل ٨,١٣ خريطة اختيار سعة المستقبل بدلالة سعة التبريد لمبردات ١٢، و٢٢، ٥٠٢.

ويصمم المستقبل الأفقي بطريقة مخالفة بعض الشيء لطريقة تصميم المستقبل الرأسي. ويمكن الرجوع إلى آشري (ASHRAE 1994) لهذا الغرض.

ولقد قامت عدة شركات بوضع خرائط لإعطاء حجم المستقبل بدلالة سعة التبريد لنظام التبريد. ويبين شكل ٨,١٣ واحدة من هذه الخرائط وتبين الخريطة العلاقة بين سعة المستقبل وسعة التبريد للنظام المستخدم. وتعتمد هذه العلاقة على

درجة حرارة التطبيق المستخدم، أي إن كانت درجة حرارة مرتفعة (تكييف هواء)، أو درجة حرارة متوسطة أو درجة حرارة منخفضة. ولقد تم إعداد الخريطة لمبرد ١٢، لذا يستخدم عامل التصحيح لسعة المستقبل إذا استخدم مبرد ٢٢ أو مبرد ٥٠٢ بدلاً من مبرد ١٢، كما هو معطى بالخريطة.

مثال ٨,٤

استخدم المعطيات الموجودة في مثال ٢,١ مع فرض ١٠ طن سعة تبريد لحساب سعة المستقبل الرأسي الذي يمكن استخدامه مع هذه المعطيات.

الحل

من حل مثال ٢,١ وباستخدام ١٠ طن تبريد بدلا من ١ طن تبريد يكون معدل سريان المبرد في النظام كما يلي:

$$\dot{m} = 0.00616 \times 10 = 0.0616 \quad \text{kg/s}$$

وعلية يكون معدل سريان حجم المبرد من البخر إلى المستقبل هو:

$$\dot{V} = 0.0616 \times 0.0774 \times 1000 = 4.8 \ \text{lit/s}$$

وبفرض استخدام مستقبل رأسي له S_v تساوى ٢٥٠مم، ومع استخدام جدول ٨,٥ عند درجة حرارة مبخر قدرها – ١٥°م نجد أن:

$$u = 0.12 \ \text{m/s}$$

وباستخدام معادلة (8.22) نجد أن:

$$H_1 = \sqrt{51 \times 4.8/0.12} = 45 \ \text{mm} = 0.045 \ \text{m}$$

وباستخدام معادلة (8.23) نجد أن:

$$D = \sqrt{1270 \times 4.8/0.12} = 225\text{mm} = 0.225 \ \text{m}$$

وحيث إن H_2 يجب أن تكون أكبر من S_v، نفرض قيمة H_2 تساوى ٠,٣ متر. ومن جداول خواص مبرد ٢٢ نجد أن كثافة سائل مبرد ٢٢ عند الخروج من المكثف تساوى ١١٧٠,٧ كجم/متر٣، وبفرض النسبة L/D حوالي ٤ عندئذ يقدر الارتفاع الكلي للمستقبل كما يلي:

$$L = 4 \times 0.225 = 0.9$$

ويقدر الحجم الكلي للمستقبل الرأسي كما يلي:

$$V_R = \frac{\pi}{4} D^2 \times L = \frac{\pi}{4} (0.225)^2 \times 0.9 = 0.036 \text{m}^3 = 36 \text{ lit}$$

وعلية يقدر الارتفاع H كما يلي:

$$H = 0.9 - 0.3 - 0.045 = 0.555 \text{m} = 0.555 \text{m} = 555 \text{mm}$$

وباستخدام شكل ٨,١٣ نجد أن حجم المستقبل المقترح عند سعة تبريد قدرها ٣٥ كيلووات ودرجة حرارة متوسطة بالمبخر هو:

$$V_R = 50 \times 0.8 = 40 \text{ lit}$$

وهى قريبة من القيمة التي حصلنا عليها عاليه، حيث تم أخذ معامل التصحيح ٠,٨ لمبرد ٢٢.

الرموز ومعانيها للفصل الثامن

COP	معامل أداء دورة التبريد [–]
C_{pl}	الحرارة النوعية لسائل المبرد [كجول/كجم.°م]
C_{pv}	الحرارة النوعية لبخار المبرد [كجول/كجم.°م]
d	القطر [م]
D	القطر الداخلي لمستقبل رأسي [م]
h	الإنثالبي [كجول/كجم]
H	ارتفاع سائل المبرد في المستقبل [م]
H_l	المسافة بين مستوى سائل المبرد ودخول المبرد إلى المستقبل [م]
HRF	معامل طرد الحرارة من المكثف [ ]
L	الطول الكلي للمستقبل [م]
$\dot{m}$	معدل سريان الكتلة [كجم/ث]
PD	إزاحة الكباس [م٣/ث]
$\dot{Q}_c$	معدل انتقال الحرارة من المكثف [وات]
r	نسبة الضغط بين مرحلتين [–]
R	معدل دوران السائل [–]
S_v	المسافة الرأسية لفصل البخار [م]
T_{wi}	درجة حرارة الماء الداخل [°م]
u	السرعة [م/ث]
$\dot{V}$	معدل السريان الحجمي [م٣/كجم]
$\dot{W}_c$	قدرة الضاغط [كيلو وات]

التذييل

fg تحول طور المادة من الحالة السائلة إلى الحالة الغازية أو العكس

l سائل

v بخار، الحجم النوعي [م٣/كجم]

الحروف الإغريقية

ε فعالية المبادل الحراري [-]

η_r الكفاءة النسبية لدورة التبريد [-]

η_v الكفاءة الحجمية للضاغط [-]

الفصل التاسع
تصميم أنابيب ومواسير المبرد

٩,١ مقدمة

تعمل مخازن التبريد في معظم الأحوال بنظم تبريد لها مكونات منفصلة تتصل ببعضها البعض بأنابيب أو مواسير لنقل المبرد بين هذه المكونات. ويهدف الفصل الحالي إلى تقديم الاعتبارات الهندسية والاقتصادية لتصميم مسار هذه الخطوط وتحديد أقطارها، لضمان عمل نظام التبريد بصورة مرضية. ويلزم التنويه هنا إلى أن عدم العناية بتصميم هذه الخطوط قد يؤدي إلى تلف بعض المعدات مثل الضواغط، أو إلى عدم استقرار الأداء لنظم التبريد.

٩,٢ أساسيات فقد الضغط في خطوط المبردات

يلزم عند تصميم خطوط المبردات حساب فقد الضغط في هذه الخطوط. وبالرجوع إلى أساسيات علم ميكانيكا الموائع والفصل الرابع من الكتاب الحالي نجد أن فقد الضغط في مواسير وأنابيب المبرد هو نتيجة جزئيين رئيسيين هما: الفقد الرئيسي للضغط $\Delta P'$، والفقد الثانوي للضغط $\Delta P''$. ويكون الفقد الكلي للضغط ΔP هو مجموع هذين الجزئيين، أي إن:

$$\Delta P = \Delta P' + \Delta P'' \qquad (9.1)$$

ويعرف الفقد الرئيسي للضغط بأنه فقد الضغط في مسار مستقيم ثابت مساحة المقطع، أما الفقد الثانوي للضغط فهو الفقد في الضغط لأي جزء في مسار خطوط المبرد خلاف الفقد الرئيسي، مثل فقد الضغط الناشئ عن تغير مساحة المقطع، أو فقد الضغط في الوصلات المختلفة كالأكواع والتفريعات والمحابس، وغيرها. ويمكن إيجاد الفقد في الضغط الرئيسي والثانوي باستخدام المعادلتين الاتيتين:

$$\Delta P' = f\,\frac{L}{D}\frac{\rho V^2}{2} \tag{9.2}$$

$$\Delta P'' = K \cdot \rho \frac{V^2}{2} \tag{9.3}$$

حيث تم تعريف الرموز السابقة في الفصل الرابع.

يعرف الفقد الثانوي للضغط في خطوط المبرد بأنه فقد الضغط نتيجة مرور المبرد في ماسورة أو أنبوبة غير ثابتة مساحة المقطع، أو غير مستقيمة، أو في الوصلات المختلفة كالأكواع والمحابس وغيرها. ويلزم الإشارة هنا إلى أن الفقد الثانوي للضغط قد يزيد في بعض الحالات عن الفقد الرئيسي للضغط. وينتج الفقد الثانوي للضغط عادة نتيجة انفصال سريان المبرد عن سطح ماسورة التبريد أو عن سطح الوصلة الموجودة بالماسورة، وأيضًا كنتيجة للدوامات التي قد توجد في السريان، بالإضافة إلى احتكاك السريان مع أي سطح صلب. ويمكن أيضا حساب الفقد الثانوي باستخدام علاقة مشابهة لعلاقة الفقد الرئيس في الضغط كالاتي:

$$\Delta P'' = f \cdot \frac{L''}{D}\frac{1}{2}\rho V^2 \tag{9.4}$$

حيث تم استخدام طول مكافئ L'' لماسورة مستقيمة لها مساحة المقطع ثابتة وفقد ضغط مساو للفقد الثانوي للضغط. ويبين جدول ٩,١ قيم الطول المكافئ L'' لعدة محابس ووصلات لخطوط مبرد بأقطار مختلفة. وباستخدام المعادلتين (9.2) و (9.4)، يحسب فقد الضغط الكلي:

$$\Delta P = f\,\frac{L_e}{D}\frac{1}{2}\rho V^2 \tag{9.5}$$

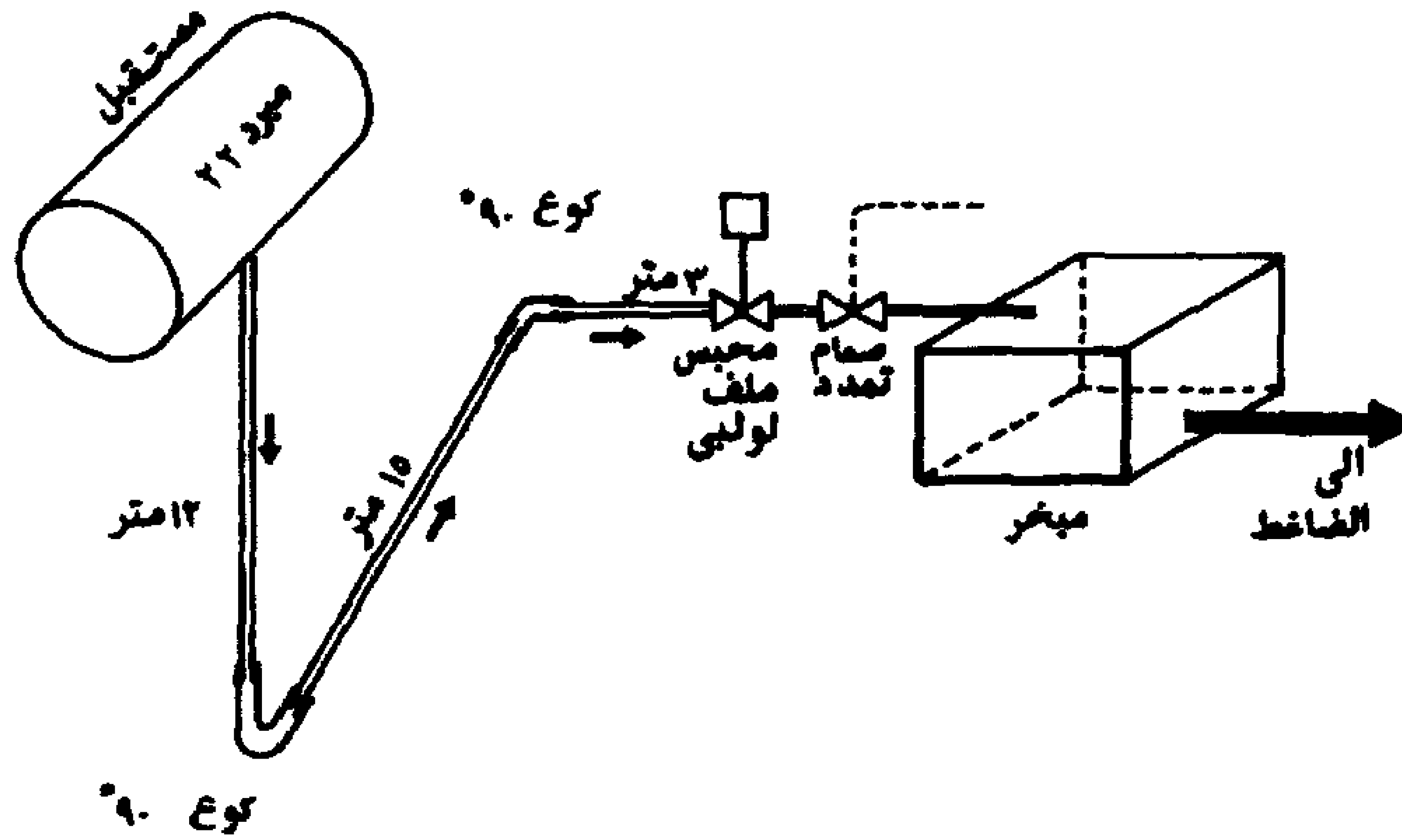
حيث الطول المكافئ L_e هو مجموع الطولين L و L'' .

جدول ٩,١ الطول المكافئ لفقد الضغط في بعض المحابس والوصلات المستخدمة في خطوط المبردات [Pita, 1984, ASHRAE 1990].

القطر الأسمى للماسورة أو الأنبوب مم	الطول المكافئ						
	كوع ٩٠ (قياسي)	كوع ٤٥ (قياسي)	كوع ١٨٠ (قياسي)	تفريعة الخط الفرعي	تفريعة الخط الرئيسي	محبس كروي أو صمام ذو ملف لوبي	محبس بوابي
١٠	٠,٤	٠,٢	٠,٧	٠,٨	٠,٣	٥,٢	٠,٢
١٥	٠,٥	٠,٢	٠,٨	٠,٩	٠,٣	٥,٥	٠,٢
٢٠	٠,٦	٠,٣	١,٠	١,٢	٠,٤	٦,٧	٠,٣
٢٥	٠,٨	٠,٤	١,٢	١,٥	٠,٥	٨,٨	٠,٣
٣٢	١,٠	٠,٥	١,٧	٢,١	٠,٧	١٢	٠,٥
٤٠	١,٢	٠,٦	١,٩	٢,٤	٠,٨	١٣	٠,٥
٥٠	١,٥	٠,٨	٢,٥	٣,٠	١,٠	١٧	٠,٧٣
٦٥	١,٨	١,٠	٣,٠	٣,٧	١,٢	٢١	٠,٩
٨٠	٢,٣	١,٢	٣,٧	٤,٦	١,٥	٢٦	١,٠
٩٠	٢,٧	١,٤	٤,٦	٥,٥	٢,٠	٣٠	١,٢
١٠٠	٣,٠	١,٦	٥,٢	٦,٤	٢,٥	٣٧	١,٤
١٢٥	٤,٠	٢,٠	٦,٤	٧,٦	٣,٠	٤٣	١,٨
١٥٠	٤,٩	٢,٤	٧,٦	٧,٦	٤,٠	٥٢	٢,١
٢٠٠	٦,١	٣,٠	١٠,٠	١٠,٠		٦٢	٢,٧

مثال ٩,١

احسب فقد الضغط في خط مبرد ٢٢ الواصل بين المستقبل وصمام التمدد لجزء نظام التبريد الموضح بشكل ٩,١. افرض درجة حرارة تشبع بالمكثف قدرها ٤٠°م ودرجة حرارة تشبع بالمبخر قدرها -١٠°م، وأن سعة التبريد بالمبخر هي ١٠٠ كيلووات، وأن خط المبرد يستخدم أنابيب نحاس بقطر داخلي قدره ٢٦مم.



شكل ٩,١ رسم تخطيطي لمثال ٩,١.

الحل

يعمل خط المبرد عند ضغط يساوي ضغط المكثف (أي ضغط مناظر لدرجة حرارة تشبع قدرها ٤٠°م). من ملحق "أ" نجد الآتي:

- إنثالبي السائل المشبع عند الخروج من المكثف = ٢٤٩,٦٥ كيلوجول/كجم
- إنثالبي البخار المشبع عند الخروج من المبخر = ٤٠١,٢ كيلوجول/كجم
- كثافة السائل المشبع عند الخروج من المكثف = ١١٢٨,٥ كجم/م^{٣}
- لزوجة السائل المشبع عند الخروج من المكثف = ١٣٩,٤ × ١٠$^{-٦}$ باسكال- ث

يقدر معدل السريان خلال خط السائل باستخدام سعة التبريد كما يلي

$$\dot{m} = \frac{100}{401.2 - 249.65} = 0.660 \quad \text{kg/s}$$

وتقدر سرعة السريان خلال الأنبوب كما يلي:

$$V = \frac{0.660}{\frac{\pi}{4}(0.026)^2 \times 1128.5} = 1.102 \quad \text{m/s}$$

ويقدر رقم رينولدز كما يلي:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{1128.5 \times 1.102 \times 0.026}{136.4 \times 10^{-6}} = 2.32 \times 10^{5}$$

من جدول ٤,١ نجد أن معامل الخشونة لأنابيب النحاس هو ٠,٠٠١٥مم، وبالتالي تقدر الخشونة النسبية للأنبوب كما يلي:

$$\varepsilon = \frac{e}{D} = \frac{0.0015}{26} = 5.7 \times 10^{-5}$$

من خريطة مودي بشكل ٤,١ نجد أن f = ٠,٠١٥، وباستخدام شكل ٩,١ وجدول ٩,١ يقدر الطول المكافئ للخط كما يلي:

$$L_e = L + 2 L''_{90^\circ\, elb} + L''_{solnoid}$$

$$= (12+15+3) + 2 \times 0.8 + 8.8 = 40.4 \text{ m}$$

باستخدام معادلة (9.5) يقدر فقط الضغط في خط المبرد عندئذ كما يلي:

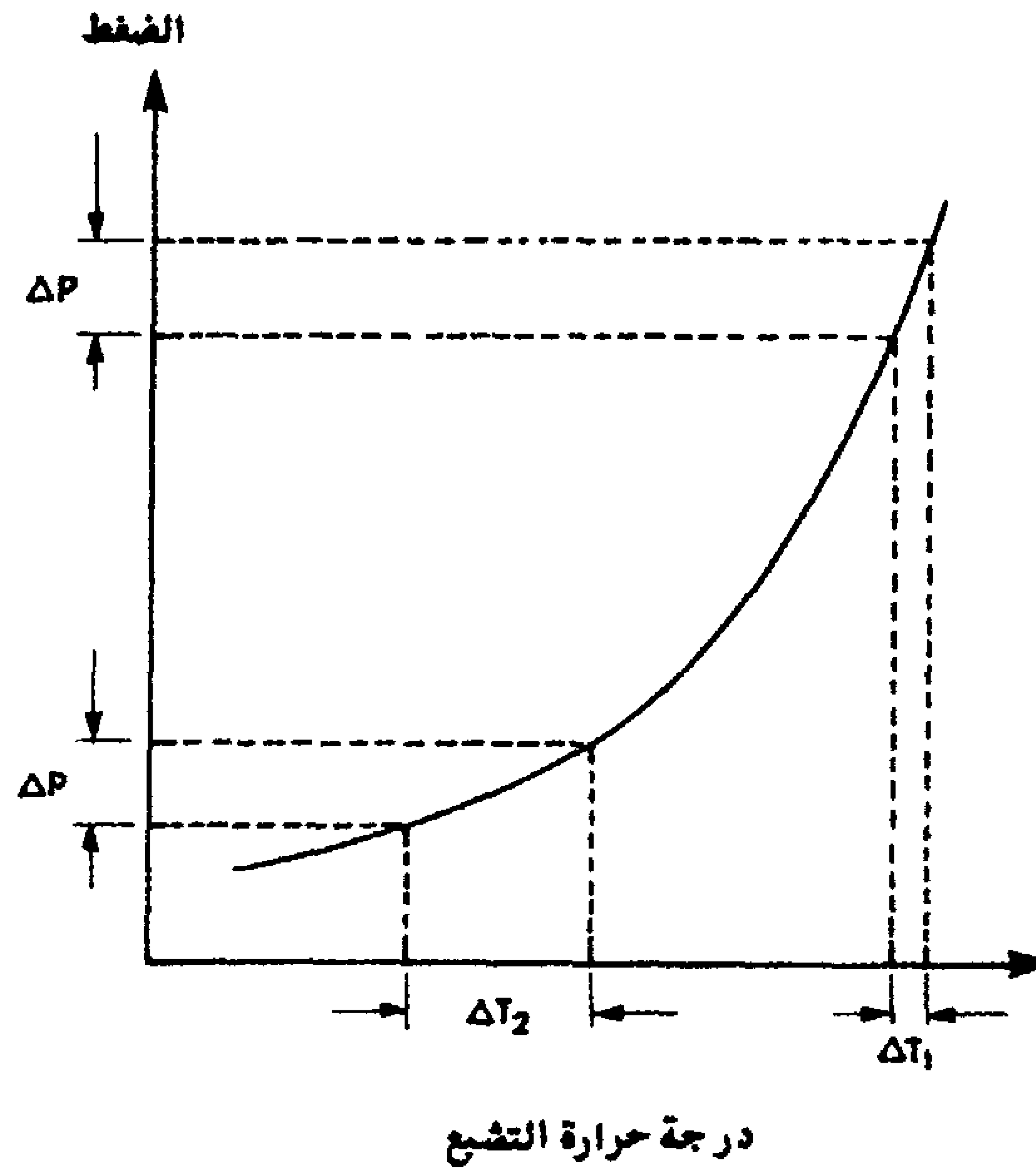
$$\Delta P = 0.015 \times \frac{40.4}{0.026} \times \frac{1}{2} \times 1128.5 \times (1.102)^2 = 15971 \quad \text{Pa}$$

أي تقريبا ١٦ كيلوبسكال.

٩,٣ التغير في درجة حرارة التشبع المكافئ لفقد الضغط

يختلف التغير في درجة حرارة التشبع المكافئ لفقد الضغط لمبرد ما تبعًا لضغط المبرد الموجود بالخط، والعلاقة بين الضغط ودرجة حرارة التشبع للمبرد تحت الدراسة. ويوضح شكل ٩,٢ هذه العلاقة لمبرد ما. ويلاحظ من الشكل أن التغير ΔT في درجة حرارة التشبع المكافئ لفقد الضغط ΔP يزيد بانخفاض درجة حرارة التشبع (أو الضغط). ومن الشائع في تصميم خطوط

المبردات استخدام تغير درجة حرارة التشبع المكافئ لفقد الضغط بدلاً من فقد الضغط. ولقد أثبتت الخبرة أنه بأخذ ΔT حوالي ١°م أو أقل في جميع خطوط نظم الأمونيا فإن فقد الضغط المناظر يكون تقريبًا هو أفضل قيمة للتشغيل الاقتصادي لهذه النظم.



شكل ٩,٢ التغير في درجة حرارة التشبع المكافئ لفقد الضغط.

مثال ٩,٢

في المثال السابق، احسب التغير في درجة حرارة التشبع المكافئ لفقد الضغط في خط المبرد الواصل بين المستقبل وصمام التمدد.

الحل

من جدول مبرد ٢٢ بملحق أ، نحسب معدل تغير الضغط مع درجة حرارة التشبع المناظرة (أي عند درجة حرارة التشبع المناظرة لضغط المبرد داخل الخط تحت الدراسة):

$$\frac{\Delta P}{\Delta T}=\frac{1609.8-1460.10}{42-38}=37.4 \quad kPa/^{\circ}C$$

ويكون التغير في درجة حرارة التشبع المكافئ لفقد الضغط في خط السائل هو:

$$\Delta T=\Delta P/\left(\frac{\Delta P}{\Delta T}\right)_{40}=16.0/37.4=0.43 \quad ^{\circ}C$$

٩,٤ الاعتبارات الهندسية لتصميم مسارات خطوط المبردات

يلزم على مصمم مسار أنابيب ومواسير المبرد مراعاة أن يحقق المسار الشروط العامة الآتية:

أ) التقليل ما أمكن من فقد الضغط في المسار لتوفير استهلاك الطاقة بالضاغط والحصول على سعة تبريد جيدة. ويتم ذلك باختيار مسارات قصيرة ومستقيمة ما أمكن مع استخدام أقل عدد ممكن من الأكواع والتفريعات.

ب) دوران زيت تزييت الضاغط في دورة التبريد، وبالتالي عودته إلى الضاغط وعدم ترسيبه في أي جزء من الأنابيب والمواسير.

ج) تشغيل متزن لدورة التبريد مع المحافظة على سلامة المعدات.

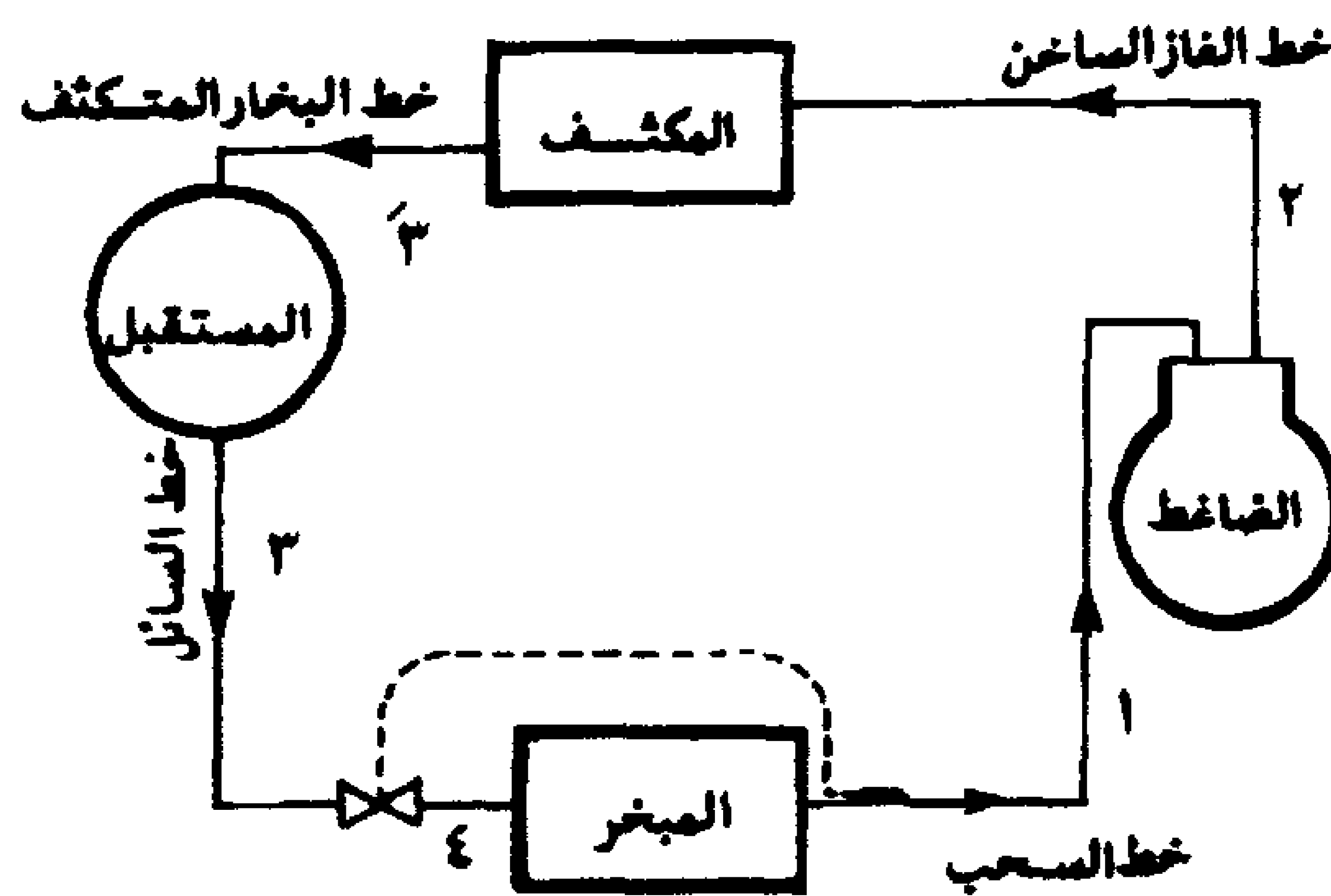
د) سهولة الصيانة لهذه المسارات عندما تتطلب الظروف إجراء صيانة لها.

هـ) انخفاض مستوى الضوضاء التي قد تنشأ عن هذه المسارات تحت ظروف تشغيل مختلفة.

وتعتبر الشروط السابقة عامة بالنسبة للنظم التي تستخدم الهالوكربونات أو الأمونيا كمبرد. إلا أن الشرط (ب) يخص نظم التبريد التي تستخدم

الهالوكربونات فقط، حيث لا يخلط زيت التزييت بالأمونيا جيدًا، مما يستلزم استخدام فاصل للزيت في خط الغاز الساخن الخارج من الضاغط، وبالرغم من استخدام فواصل الزيت هذه، إلا أن بعض الزيت المحمول بالأمونيا يتم ترسيبه بالفعل في قاع المبخر، مما يستلزم وجود توصيلات خاصة لإرجاعه مرة أخرى إلى الضاغط. كما يجب ملاحظة أن التطبيقات التي تعمل عند درجة حرارة مبخر منخفضة نسبيًا (أقل من -٢٨°م) ينفصل بها قدر كبير من زيت التزييت في المبخر وتزداد لزوجته بانخفاض درجة الحرارة، مما يصعب معه إرجاعه إلى خط السحب ثم حمله إلى الضاغط، عندئذ ينصح بتركيب فاصل زيت بعد الضاغط.

تنقسم خطوط المبرد تبعًا لحالة المبرد داخل هذه الخطوط كما هو مبين بشكل ٩,٣ إلى الآتي:



شكل ٩,٣ رسم تخطيطي لدورة التبريد مع توضيح خطوط المبرد المختلفة.

أ) خط السائل، وهو الخط الحامل لسائل المبرد إلى صمام التمدد. ويبدأ هذا الخط عادة من المكثف، إلا إذا كان هناك مستقبل فيبدأ الخط من المستقبل.

ب) خط السحب، وهو الخط الواصل بين المبخر والضاغط، ويحمل هذا الخط بخار المبرد المخلوط بنسبة من زيت التزييت العائد الضاغط.

ج) خط الغاز الساخن الواصل بين الضاغط والمكثف، ويحمل هذا الخط غاز المبرد الساخن المخلوط بنسبة من زيت التزييت الهارب من الضاغط.

د) خط البخار المكثف، وهو الخط الواصل بين المكثف والمستقبل. ويلغى هذا الخط في حالة عدم وجود مستقبل.

ويراعى عند تصميم مسارات هذه الخطوط عمومًا ألا يوضع أي منها على الأرضية مباشرة، وإنما يجب أن تعلق على الحوائط والأسقف، وأن تكون المسارات مستقيمة ما أمكن وفي أماكن لا تعيق صيانة أجهزة ومعدات التبريد. وتعلق خطوط المبرد الموجودة على الحوائط بحوامل جانبية على ألا تزيد المسافة بين كل حاملين عن ٣ أمتار، أما الخطوط الموجودة بالسقف فتعلق بحمالات على مسافات لا تزيد أيضًا عن ٣ أمتار. وتدعم الخطوط الرأسية من أعلى أو من أسفل على حد سواء. ويجب أن يؤخذ في الاعتبار التمدد الحراري لهذه الخطوط، وهو يقدر عادة بحوالي ٢٠مم لكل ٣٠ مترًا. ويراعى هذا التمدد في تصميم خطوط المبرد بألا يثبت أي خط أفقي من طرفيه، وإنما يكفى التثبيت من طرف واحد فقط مع ترك الطرف الآخر حر الحركة. ونظرًا لطبيعة خطوط المبرد التي تحوي دائمًا خطوط رأسية وكذا مصائد لتجميع السائل، فإن شكل الخطوط تأخذ عادة حروف L وZ وU في أماكن كثيرة منها، مما يساعد ضمان عدم التعرض لأي مشكلة ناجمة عن التمدد الحراري لهذه الخطوط.

وفيما يلي سنعرض الاعتبارات الهندسية الأخرى الخاصة بتصميم مسارات خطوط المبرد المختلفة كل على حده مع طريقة حساب أقطار هذه الخطوط.

٩,٥ جداول حساب أقطار خطوط المبرد

بينا في الأجزاء السابقة الاعتبارات الهندسية لتصميم مسار خطوط المبرد المختلفة، كما أن إجمالي فقد الضغط في أي خط نتيجة فقد الضغط الرئيسي أو الثانوي لسريان المبرد (سائل أو بخار) يعطى بالمعادلة (9.5) . كما بينا أيضًا أن كل خط من خطوط المبرد يصمم أساسًا على حد السماح الأمثل لفقد الضغط ΔPخلال الخط، بالإضافة إلى الاعتبارات الهندسية الأخرى. وبناء على ذلك، إذا عرفت ΔP للخط والطول الكلي المكافئ L_e له، وكذلك سرعة المبرد بالخط V، يمكن حساب القطر الداخلي للخط من المعادلة (9.5). ويتطلب هذا الحساب استخدام أحد طرق المحاولة والخطأ، حيث إن معامل الاحتكاك f يعتمد على القطر وسرعة سريان المبرد وخشونة سطح مادة الأنابيب أو المواسير المستخدمة إن كان السريان مضطربًا، كما بينا في الجزء ٩,٢. ويتضح أن حساب القطر الداخلي لكل خط من خطوط المبرد عملية صعبة حسابيًا ومملة.

لتسهيل حساب قطر خط المبرد، دعنا نفكر بطريقة أخرى. بفرض حد السماح لفقد الضغط لوحدة أطوال قياسية، يمكن عندئذ تصميم جداول باستخدام الطريقة الموضحة عاليه للعلاقة بين $\dot{m}$ (أيV) وD حيث يمثل D قطر الخط لأنبوب أو ماسورة قياسية، و $\dot{m}$ هي معدل سريان الكتلة بالخط الذي يحقق حد السماح لفقد الضغط في الوحدة القياسية للأطوال. ويمكن استبدال معدل السريان $\dot{m}$ بسعة التبريد بفرض دائرة تبريد بسيطة بدلالة درجة حرارة التشبع للمكثف والمبخر. وتعتبر هذه هي الفكرة الأساسية لجداول حساب أقطار خطوط المبرد والمعدة من قبل الجمعية الأمريكية لمهندسي التدفئة والتبريد وتكييف الهواء [ASHRAE]، وكذلك من قبل بعض الشركات الصناعية العاملة في هذا المجال. ويبين الجدول ٩,٢ قيم سعة التبريد لمبرد ٢٢ باستخدام أنابيب نحاسية ومواسير صلب بالمقاسات الاسمية المبينة بالجدول. ولقد صمم الجدول بفرض أن حد

السماح لفقد الضغط يناظر تغير درجة حرارة تشبع قدره ٠,٠٤ درجة مئوية لكل متر طولي من خط السحب و ٠,٠٢ درجة مئوية لكل متر من خط الغاز الساخن وخط السائل. ويعطي الجدول البيانات الآتية: سعة التبريد لخط السحب وخط الغاز الساخن عند درجات حرارة تشبع مختلفة بخط السحب. كما يبين الجدول أيضًا سعة التبريد المناظرة إذا اختير خط السائل وخط البخار المتكثف بالأقطار المبينة بالجدول. وذلك لنظام مرحلة وسطى أو مرحلة منخفضة.

ويبين جدول ٩,٣ نفس المعلومات السابقة لمبرد ٢٢ لنظام بمرحلة واحدة أو مرحلة عليا. وأخيرًا يعطي جدول ٩,٤ نفس المعلومات عند استخدام الأمونيا كمبرد. ويجب ملاحظة الآتي عند استخدام الجداول ٩,٢ و ٩,٣ و ٩,٤:

أ) إذا اختلف طول الخط عن الطول القياسي بالجدول (متر واحد) واختلف التغير في درجة حرارة التشبع المكافئ لفقد الضغط عند القيمة المعطاة بالجدول، فإن سعة التبريد المعطاة يجب تصحيحها بالعلاقة التالية:

$$\dot{Z}=\dot{Z}_t(1/L_e)^{0.55}\left(\frac{\Delta T_t}{\Delta T}\right)^{0.55} \qquad (9.6)$$

حيث $\dot{Z}_t$ و $\dot{Z}$ هما قيمتا سعة التبريد بالجدول والفعلية على التوالي (كيلووات)، و L_e هي الطول المكافئ الفعلي (متر) لخط المبرد، و ΔT_t و ΔT هما التغير في درجة حرارة التشبع المكافئ لفقد الضغط من الجدول والفعلي على التوالي (°م/متر).

ب) إذا استخدمت الخطوط لسعات تبريد فعلية $\dot{Z}$ تختلف عن تلك المعطاة بالجداول $\dot{Z}_t$، فإن تغير درجة حرارة التشبع المكافئ لفقد الضغط المعطى بالجدول يجب تصحيحه كما يلي:

$$\Delta T = \Delta T_t L_e \left(\frac{\dot{Z}}{\dot{Z}_t} \right)^{1.8} \qquad (9.7)$$

حيث الرموز لها نفس التعريفات والوحدات المعطاة سابقًا.

ج) تعطي الجداول قيمة سعة التبريد لدرجة حرارة تشبع قياسة بالمكثف (٤٠ أو ٣٠ أو -١٥°م) فإذا اختلفت درجة حرارة المكثف عن هذه الدرجة القياسية للجدول، وجب تصحيح سعة التبريد بالجدول كما يلي:

$$\dot{Z} = F\,\dot{Z}_t \qquad (9.8)$$

حيث F هي معامل التصحيح. وتعطى قيم F أسفل كل جدول. وستوضح الأمثلة في الأجزاء التالية كيفية استخدام هذه الجداول.

٩,٦ تصميم مسار خط السائل

يراعى عند تصميم خط السائل الممتد من المستقبل إلى دخول محبس التمدد عدم وجود أي عوائق للسريان، وأن يكون الخط مستقيمًا ما أمكن، وألا يزيد الفقد في الضغط عن حد السماح. ويعرف حد السماح لفقد خط السائل بأنه فقد الضغط الذي يؤدي إلى تبخر جزء من السائل. ومن أهم عيوب هذا التبخر أنه يعوق أداء محبس التمدد ويؤدي إلى انخفاض معدل سريان المبرد إلى المبخر. أضف إلى هذا فإن تبخر جزء من سائل المبرد يزيد حجم سريان سائل المبرد وبخاره المارين بمحبس التمدد مما يعمل على تآكل مقعد الصمام. ويعتبر حد السماح لفقد الضغط هو العامل الوحيد الذي يؤخذ في الاعتبار عند تصميم خط السائل، ولا يوجد هناك أي من الاحتياطات الخاصة بسريان زيت التزييت إلى المبخر لعودته إلى الضاغط نظرًا لوجود خليط الزيت والمبرد في الحالة السائلة.

جدول ٩,٢ سعة التبريد بالكيلوات لمبرد ٢٢ (المرحلة الوسطى أو المرحلة المنخفضة) لخطوط السحب، والغاز الساخن، والسائل* [ASHRAE 1990].

خط السائل	خط الطرد	خط السحب (Δt=٠,٠٤ كلفن/م) درجة حرارة التشبع للسحب −٣٠°م	−٤٠°م	−٥٠°م	−٦٠°م	−٧٠°م	القطر الاسمي (مم)
		الضغط المقابل باسكال/م					
راجع جدول ٩,٣		٢٢٨	١٢١	٨١,٥	٥١,٣	٣١,٠	
	٠,٧٤	٠,٧٣	٠,٤٧	٠,٢٧	٠,٠٦	٠,٠٩	١٢
	١,٤٣	١,٣٩	٠,٩٠	٠,٥٢	٠,٣١	٠,١٧	١٥
	٢,٤٩	٢,٤٣	١,٥٧	٠,٩١	٠,٥٥	٠,٢٩	١٨
	٤,٤١	٤,٣٠	٢,٧٨	١,٦٢	٠,٩٧	٠,٥٢	٢٢
	٨,٧٤	٨,٥٢	٥,٥٢	٣,٢٢	١,٩٤	١,٠٥	٢٨
	١٦,٠٨	١٥,٦٨	١٠,١٧	٥,٩٥	٣,٦٠	١,٩٤	٣٥
	٢٦,٧٣	٢٦,٠٧	١٦,٩٣	٩,٩٢	٦,٠٠	٣,٢٦	٤٢
	٥٣,٢٨	٥١,٩٨	٣٣,٧٥	١٩,٨٣	١٢,٠٣	٦,٥٤	٥٤
	٩٥,٠٦	٩٢,٧٦	٦٠,٣٨	٣٥,٤٧	٢١,٥٧	١١,٧٧	٦٧
	١٧٤,٢٢	١٤٣,٦٩	٩٣,٧٢	٥٥,٢٠	٣٣,٥٤	١٨,٣٢	٧٩
	٣١٦,١٣	٣٠٨,٠٢	٢٠١,٢٠	١١٨,٦٦	٧٢,٣٣	٣٩,٦٠	١٠٥
	٥٦١,٨٩	٥٤٨,٦٦	٣٥٨,٥٢	٢١١,٧٠	١٢٩,١٧	٧٠,٨٧	١٣٠
	٩١٥,٠٢	٨٩١,٧١	٥٨٣,١٦	٣٤٤,٩٩	٢١٠,٨٣	١١٥,٧٤	١٥٦

* القيم في الجدول على أساس درجة حرارة التشبع في المكثف −١٥°م. عند اختلافها عن ذلك تضرب القيمة من الجدول في عامل التصحيح F الآتي بناء على درجة حرارة التشبع في المكثف.

درجة حرارة التشبع في المكثف [°م]	خط السحب	خط الطرد
−٣٠	١,٠٨	٠,٧٤
−٢٠	١,٠٣	٠,٩١
−١٠	٠,٩٨	١,٠٩
٠	٠,٩١	١,٢٩

جدول ٩,٣ سعة التبريد بالكيلوات لمبرد ٢٢ (مرحلة واحدة أو المرحلة العليا) لخطوط السحب، والغاز الساخن، والسائل* [ASHRAE 1990].

خط السائل		خط الطرد			خط السحب (Δt=٠,٠٤ كلفن/م)					القطر
		Δt=٠,٠٢ كلفن/م، Δp=٧٤٩			درجة حرارة التشبع للسحب					الاسمي
Δt=٠,٠٢ كلفن/م Δp=٧٤٩	السرعة ٠,٥ م/ث	درجة حرارة التشبع			٥°م	-٥°م	-٢٠°م	-٣٠°م	-٤٠°م	(مم)
					الضغط المقابل باسكال/م					
		٥°م	-٢٠°م	-٤٠°م	٧٣١	٥٧٢	٣٧٨	٢٧٧	١٩٦	
مواسير نحاس										
١١,٢٤	٧,٠٨	٢,٦٠	٢,٤٤	٢,٣٠	١,٧٦	١,٢٨	٠,٧٥	٠,٥	٠,٣٢	١٢
٢١,٥٤	١١,٤٩	٤,٩٠	٤,٦٥	٤,٣٧	٣,٣٧	٢,٤٥	١,٤٣	٠,٩٥	٠,٦١	١٥
٣٧,٤٩	١٧,٤١	٨,٥٩	٨,٠٦	٧,٥٩	٥,٨٥	٤,٢٦	٢,٤٩	١,٦٦	١,٠٦	١٨
٦٦,١٨	٢٦,٦٦	١٥,٠٧	١٤,١٥	١٣,٣٢	١٠,٣١	٧,٥١	٤,٣٩	٢,٩٣	١,٨٨	٢٢
١٣١,٠	٤٤,٥٧	٢٩,٧٠	٢٧,٨٩	٢٦,٢٤	٢٠,٣٤	١٤,٨٣	٨,٧١	٥,٨٢	٣,٧٣	٢٨
٢٤٠,٧	٧٠,٥٢	٥٤,٣٧	٥١,٠٥	٤٨,٠٣	٣٧,٣١	٢٧,٢٢	١٥,٩٩	١٠,٧	٦,٨٦	٣٥
٣٩٩,٣	١٠٣,٤	٩٠,٠٠	٨٤,٥٢	٧٩,٥٠	٦١,٨٤	٤٥,١٧	٢٦,٥٦	١٧,٨٠	١١,٤٤	٤٢
٧٩٤,٢	١٧٤,١	١٧٨,١	١٦٧,٢	١٥٧,٣	١٢٢,٧	٨٩,٦٩	٥٢,٨١	٣٥,٤٩	٢٢,٨١	٥٤
١٤١٥,٠	٢٦٩,٩	٣١٦,٣	٢٩٧,٠	٢٧٩,٤	٢١٨,٣	١٥٩,٥	٩٤,٠٨	٦٣,٣٤	٤٠,٨١	٦٧
٢١٩٠,٩	٣٧٦,٥	٤٨٨,٢	٤٥٨,٥	٤٣١,٣	٣٣٧,٩	٢٤٧,٢	١٤٥,٩	٩٨,١٣	٦٣,٣٤	٧٩
٤٦٩٧,٠	٦٧٢,٠	١٠٤١	٩٧٧,٠	٩١٩,٧	٧٢١,٩	٥٢٧,٨	٣١٢,٢	٢١٠,٣	١٣٦,٠	١٠٥
مواسير صلب										
١٥,٩٦	١٠,٦٦	٣,٤٤	٣,٢٣	٣,٠٤	٢,٤٢	١,٧٨	١,٠٦	٠,٧٢	٠,٤٧	١٢
٢٩,٦٢	١٦,٩٨	٦,٣٦	٥,٩٧	٥,٦٢	٤,٤٨	٣,٣٠	١,٩٨	١,٣٥	٠,٨٨	١٥
٦٥,٥٥	٢٩,٧٩	١٣,٣٦	١٢,٥٥	١١,٨٠	٩,٤٤	٦,٩٥	٤,١٧	٢,٨٤	١,٨٦	٢٠
١١٨,٢	٤٨,١٩	٢٥,٢٤	٢٣,٧٠	٢٢,٢٩	١٧,٨٢	١٣,١١	٧,٨٧	٥,٣٧	٣,٥٢	٢٥
٢٤٤,٤	٨٣,٥٦	٥٢,١١	٤٨,٩٤	٤٦,٠٤	٣٦,٧٩	٢٧,١١	١٦,٢٧	١١,١٢	٧,٣١	٣٢
٣٦٦,٦	١١٣,٧	٧٨,٠٧	٧٣,٣١	٦٨,٩٦	٥٥,٢١	٤٠,٦٧	٢٤,٤٥	١٦,٧١	١٠,٩٨	٤٠
٧٠٧,٥	١٨٧,٥	١٥٠,٥	١٤١,٣	١٣٢,٩	١٠٦,٤	٧٨,٥١	٤٧,١٩	٣٢,٢٣	٢١,٢١	٥٠
١١٢٧,٣	٢٦٧,٣	٢٣٩,٣	٢٢٤,٧	٢١١,٤	١٦٩,٥	١٢٤,٨	٧٥,١٩	٥١,٤٤	٣٣,٨٤	٦٥
١٩٩١,٣	٤١٢,٧	٤٢٢,٩	٣٩٧,١	٣٧٣,٦	٢٩٩,٥	٢٢٠,٨	١٣٢,٨	٩٠,٩٥	٥٩,٨٨	٨٠
٤٠٦٣,٢	٧١١,٢	٨٦٢,٢	٨٠٩,٧	٧٦١,٧	٦١٠,٦	٤٥٠,١	٢٧٠,٧	١٨٥,٦	١٢٢,٣	١٠٠

- القيم في الجدول على أساس درجة حرارة التشبع في المكثف ٤٠°م، عند اختلافها عن ذلك تضرب القيمة من الجدول في عامل التصحيح *F* الآتي بناء على درجة حرارة التشبع في المكثف.

درجة حرارة التشبع في المكثف [°م]	خط السحب	خط الطرد
٢٠	١,١٨	٠,٨٠
٣٠	١,١٠	٠,٨٨
٤٠	١,٠	١,٠
٥٠	٠,٩١	١,١١

جدول ٩,٤ سعة التبريد بالكيلوات للأمونيا (مرحلة واحدة أو المرحلة العليا) لخطوط السحب، والغاز الساخن، والسائل* [ASHRAE 1990].

خط السائل		خط الطرد			خط السحب (Δt=٠,٠٢ كلفن/م)					
		Δt=٠,٠٢ كلفن/م Δp=٦٨٤ باسكال/م			درجة حرارة التشبع للسحب					حديد صلب
Δp= ٤٥٠	السرعة ٠,٥ م/ث	٥°م	-٢٠°م	-٤٠°م	٥°م Δp= ٣٧٠,٥	-٥°م Δp= ٢٧٦,٦	-٢٠°م Δp= ١٦٨,٨	-٣٠°م Δp= ١١٦,٣	-٤٠°م Δp= ٧٦,٩	القطر الاسمي (مم)
٦٣,٨	٣,٩	٨,٥	٨,٣	٨,٠	٤,٩	٣,٥	١,٩	١,٢	٠,٨	١٠
١١٨,٤	٦٣,٢	١٥,٧	١٥,٣	١٤,٩	٩,١	٦,٥	٣,٦	٢,٣	١,٤	١٥
٢٥٠,٢	١١٠,٩	٣٣,٢	٣٢,٣	٣١,٤	١٩,٣	١٣,٧	٧,٧	٤,٩	٣,٠	٢٠
٤٧٣,٤	١٧٩,٤	٦٢,٦	٦١,٠	٥٩,٤	٣٦,٤	٢٥,٩	١٤,٦	٩,٤	٥,٨	٢٥
٩٧٨,٠	٣١١,٠	١٢٩,٤	١٢٦,٠	١٢٢,٧	٧٥,٤	٥٣,٧	٣٠,٢	١٩,٦	١٢,١	٣٢
١٤٦٩,٤	٤٢٣,٤	١٩٤,٥	١٨٩,٤	١٨٤,٤	١١٣,٣	٨٠,٦	٤٥,٥	٢٩,٥	١٨,٢	٤٠
٢٨٤٠,٥	٦٩٧,٨	٣٧٤,٧	٣٦٤,٩	٣٥٥,٢	٢١٨,٦	١٥٥,٧	٨٨,١	٥٧,٢	٣٥,٤	٥٠
٤٥٢٤,٨	٩٩٤,٨	٥٩٧,٠	٥٨١,٤	٥٦٥,٩	٣٤٨,٩	٢٤٨,٦	١٤٠,٦	٩١,٦	٥٦,٧	٦٥
٨٠٠٨,٨	١٥٣٦,٣	١٠٥٦,٩	١٠٢٩,٣	١٠٠١,٩	٦١٦,٩	٤٣٩,٨	٢٤٩,٠	١٦٢,٤	١٠١,٠	٨٠
—	—	٢١٥٤,٣	٢٠٩٨,٢	٢٠٤٢,٢	١٢٥٨,٦	٨٩٧,٨	٥٠٩,٢	٣٣٢,٦	٢٠٦,٩	١٠٠
—	—	٣٨٨٤,٢	٣٧٨٣	٣٦٨٢,١	٢٢٧١,٤	١٦٢٢	٩٠٢,٦	٦٠١,٨	٣٧٥,٢	١٢٥
—	—	٦٢٨١	٦١١٧,٤	٥٩٥٤,٢	٣٦٧٢,٥	٢٦٢٥,٤	١٤٩١,٤	٩٧٥,٦	٦٠٨,٧	١٥٠
—	—	١٢٨٦,٨	١٢٥٢٩,٧	١٢١٩٥,٣	٧٥٣٠,٤	٥٣٨٢,٥	٣٠٥٦	٢٠٠٠,٣	١٢٥٢,٣	٢٠٠
---	---	٢٣٢٣٧,٥	٢٢٦٣٢,٢	٢٢٠٢٨,٢	١٣٦١٩,٦	٩٧٣٣,٧	٥٥٣٩,٩	٣٦٢٥,٩	٢٢٧١	٢٥٠
---	---	٣٧١٧٤,٣	٣٦٢٠٦,٠	٣٥٢٣٩,٧	٢١٧٨٧	١٥٥٦٨,٩	٨٨٧٣,٤	٥٨١٣,٥	٣٦٤٠,٥	٣٠٠

* القيم في الجدول على أساس درجة حرارة التشبع في المكثف ٣٠°م، عند اختلافها عن ذلك تضرب القيمة من الجدول في عامل التصحيح F الآتي بناء على درجة حرارة التشبع في المكثف.

درجة حرارة التشبع في المكثف [°م]	خط السحب	خط الطرد
٢٠	١,٠٤	٠٨٦
٣٠	١,٠	١,٠
٤٠	٠,٩٦	١,٢٤
٥٠	٠,٩١	١,٤٣

يتكون فقد الضغط في أنابيب سائل المبرد من الفرق بين الضغط عند الخروج من المستقبل والضغط عند الدخول لمحبس التمدد، ويكون فقد الضغط الكلي هو حاصل جمع فقد الضغط ΔP_f نتيجة الاحتكاك بين سائل المبرد وجدار الأنابيب أو المواسير والفقد أو الزيادة ΔP_h في الضغط الناتج عن ارتفاع أو انخفاض سائل المبرد عن مستوى الخروج من المستقبل. فتبعًا لمعادلة برنولي لميكانيكا الموائع لاتزان طاقة الوضع مع طاقة السريان الناشئة عن الضغط (عند ثبات طاقة الحركة)، فإن فقد الضغط ΔP_h نتيجة ارتفاع السائل لمسافة h عن مستوى سطح السائل بالمستقبل تعطى بالعلاقة التالية:

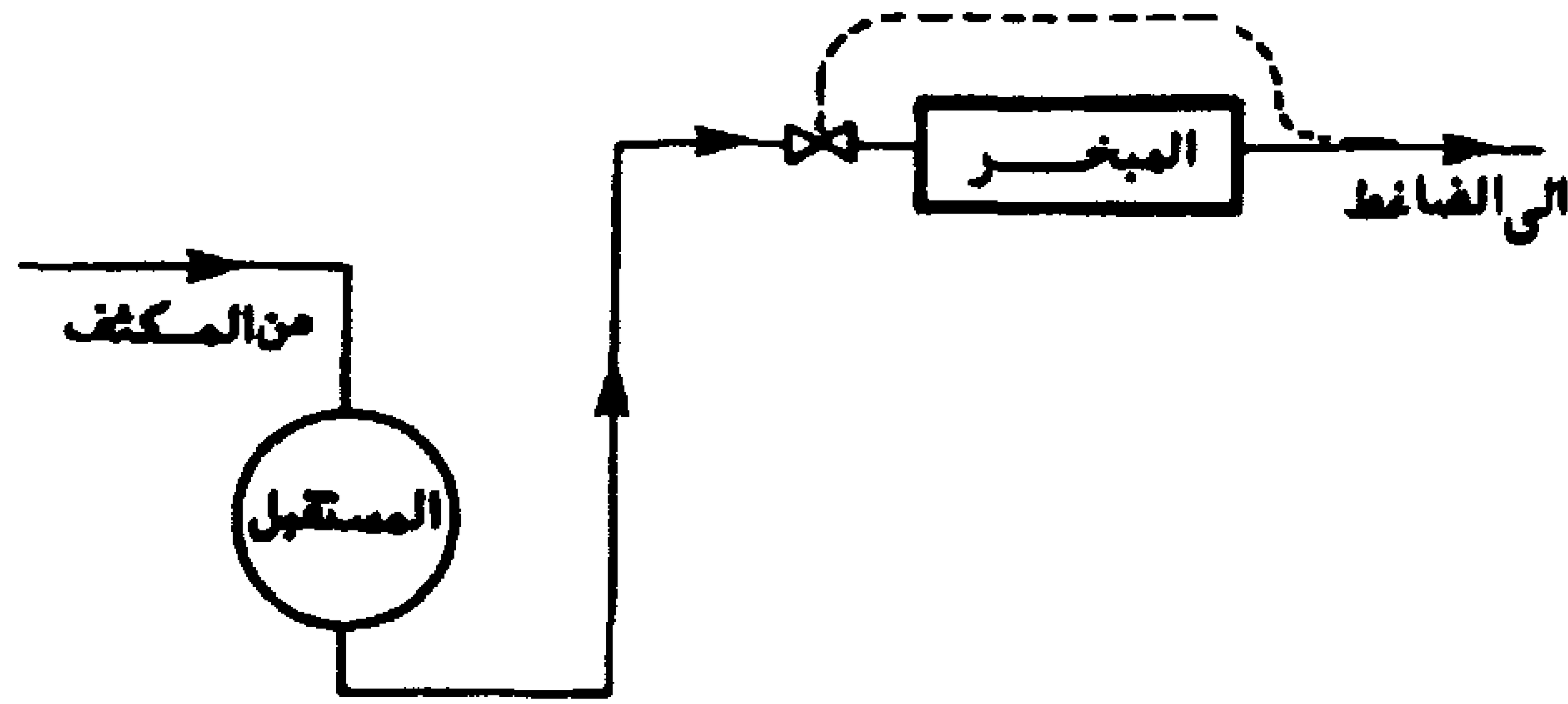
$$\Delta P_h = \rho g h \qquad (9.9)$$

حيث ρ هي كثافة سائل المبرد و g هي عجلة الجاذبية الأرضية. وتكون قيمة ΔP_h سالبة (أي ارتفاع قيمة الضغط) إذا كانت قيمة h سالبة أي انخفاض السائل عن مستواه بالمستقبل، وبناء عليه يكون الفقد الكلي ΔP في الضغط لخط السائل هو:

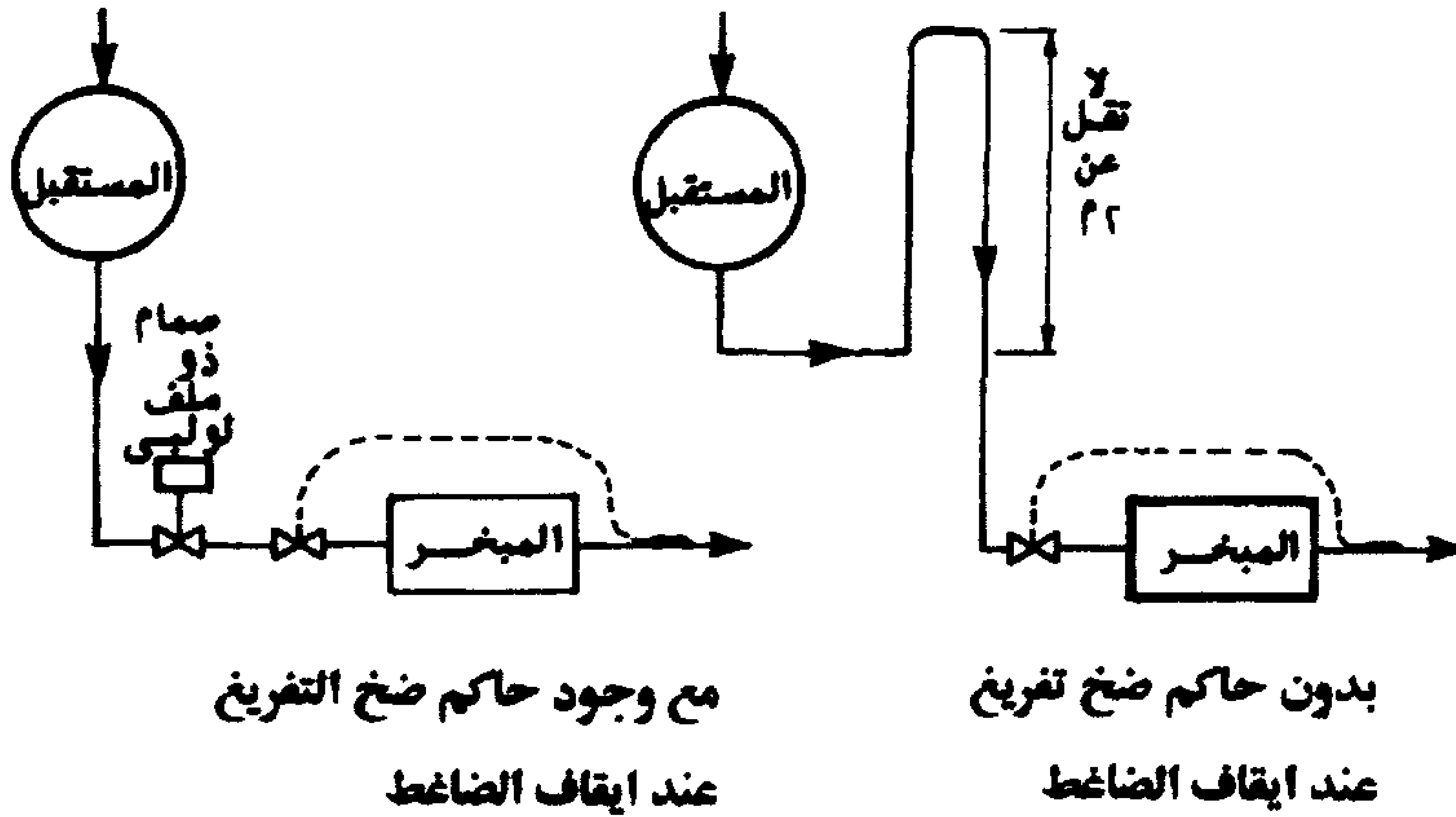
$$\Delta P = \Delta P_f + \Delta P_h \qquad (9.10)$$

ويعتمد مسار خط السائل بين المستقبل والمبخر على وضع المستقبل بالنسبة للمبخر، وعلى كون النظام يعمل ذاتيًا بنظام ضخ تفريغ عند إيقاف الضاغط أم لا. فإذا كان المستقبل أسفل المبخر، فإن مسار خط السائل لا يحتاج إلى أي اعتبارات هندسية، ويكون المسار كما هو موضح بشكل ٩,٤(أ). أما إذا كان موقع المستقبل أعلى من المبخر فيصمم مسار خط السائل تبعًا لكون النظام يعمل بتحكم لضخ التفريغ عند التوقف أم لا. ويوضح شكل ٩,٤(ب) (الرسم الأيسر) مسار خط السائل لهاتين الحالتين، حيث يلاحظ عند وجود تحكم في ضخ التفريغ عند إيقاف الضاغط وضع صمام ملف لولبي قبل دخول سائل

المبرد إلى محبس التمدد، ويقفل هذا الصمام فور وقوف الضاغط، لمنع سريان السائل إلى الضاغط عند بدء التشغيل، مما يتلف الضاغط. أما إذا لم تشمل الدائرة نظام تحكم لضخ التفريغ عند الإيقاف، فيلزم عندئذ أن يأخذ المسار الشكل الموضح بشكل ٩,٤(ب) (الرسم الأيمن) لمنع سريان سائل المبرد من المستقبل إلى المبخر عند إيقاف الضاغط.



(أ) مستوى قاعدة المبخر أعلى من مستوى سطح السائل فى المستقبل



(ب) مستوى قاعدة المبخر تحت مستوي سطح السائل في المستقبل

شكل ٩,٤ مسار خط السائل تبعا لمستوى قاعدة المبخر بالنسبة لمستوى السائل بالمستقبل.

يحسب قطر خط السائل بمراعاة ألا يزيد فقد الضغط الكلي المعطى بالمعادلة (9.2) خلال الخط عن القيمة التي قد تسبب تبخر جزء من سائل المبرد فجائيًا في خط السائل. لذا يلزم حساب تغير درجة حرارة التشبع المكافئ لفقد الضغط الكلي ومقارنته بمقدار درجات التبريد التحتي عند الخروج من المستقبل للتأكد من عدم تبخر جزء من سائل المبرد فجائيًا في خط السائل. ولاستخدام معادلة (9.2) لحساب فقد الضغط الكلي، يحسب فقد الضغط الناتج عن الاحتكاك أولاً باستخدام الجداول ٩,٢ إلى ٩,٤، ثم يحسب فقد أو زيادة الضغط الناتج عن تغير طاقة وضع السائل بين المستقبل والمبخر من معادلة (9.9)، وسيوضح المثال التالي كيفية حساب قطر خط السائل.

مثال ٩,٣

في مثال ٩,٢، استخدم الجداول لاختيار أنبوبًا من النحاس لخط السائل. ناقش ماذا يحدث إذا كان طول الأنبوب الرأسي الهابط ٢ مترا بدلاً من ١٢ مترًا، وكان طول الأنبوب الأفقي ٥٥ مترًا بدلا من ١٥ مترًا. افرض في جميع الأحوال خروج السائل من المستقبل عند درجة حرارة قدرها ٣٨°م.

الحل

من جدول ٩,٣ لمبرد ٢٢، باستخدام أنبوبًا نحاسيًا بقطر اسمي قدره ٢٨مم، فإن سعة التبريد تكون ١٣١,٠ كيلووات. من جدول ٩,١ نحسب الطول المكافئ كما يلي:

$$L_e = 12 + 15 + 3 + 2 \times 0.8 + 8.8 = 40.4 \text{ m}$$

وباستخدام معادلة ٩,٧ يكون التغير في درجة حرارة التشبع المكافئ لفقد الضغط نتيجة الاحتكاك هو:

$$(\Delta T_e)_f = \Delta T_t L_e (\frac{\dot{Z}}{\dot{Z}_t})^{1.8}$$
$$= 0.02 \times 40.4 (\frac{100}{131})^{1.8} = 0.5\,^{\circ}C$$

مقارنة بالقيمة ٠,٤٣°م التي حصلنا عليها في مثال ٩,٢.

ويحسب الفقد/الزيادة في الضغط نتيجة تغير مستوى السائل من معادلة ٩,٩ كما يلي:

$$\Delta P_h = \rho g h = 1128.4 \times 9.81 \times (-12) = -132.8 \;\; \text{kPa}$$

حيث أخذت الكثافة بالقيمة ١١٢٨,٤ كجم/م[٣] من ملحق أ. ويكون معدل تغير الضغط مع درجة حرارة التشبع (عند درجة تشبع قدرها ٤٠°م) كما هو معطى بالمثال ٩,٢.

عندئذ يقدر التغير في درجة حرارة التشبع المكافئ للقيمة ΔP_h كما يلي:

$$(\Delta T_e) = -132.8 / 37.4 = -3.55 \;\; ^{\circ}\text{C}$$

ويكون إجمالي التغير في درجة حرارة التشبع المكافئ لفقد الضغط هو:

$$\Delta T_e = (\Delta T_e)_f + (\Delta T_e)_h$$
$$= 0.5 - 3.55 = -3.05 \;\; ^{\circ}\text{C}$$

أي إن درجات التبريد التحتي ستزيد بمقدار ٣,٠٥°م. ويعني هذا إمكانية تصغير القطر الاسمي للأنبوب توفيرًا للتكلفة الأولية لخط السائل دون خشية الإقلال من درجات التبريد التحتي.

ندرس الآن اختيار مقاس خط السائل إذا انخفض طول الأنبوب الرأسي إلى مترين وزاد طول الأنبوب الأفقي إلى ٥٥ مترًا وبقاء ظروف التشغيل ثابتة.

من جدول ٩,٣ نختار أيضًا أنبوبًا نحاسيًا بقطر اسمي قدره ٢٨مم وسعة تبريد قدرها ١٣١,٠ كيلووات. نحسب الطول المكافئ للخط بالأبعاد الجديدة كما يلي:

$$L_e = 2 + 55 + 3 + 2 \times 0.8 + 8.8 = 70.4 \text{ m}$$

وبالتالي يكون:

$$(\Delta T_e)_f = 0.02 \times 70.4 \left(\frac{100}{131}\right)^{1.8} = 0.87 \quad ^\circ\text{C}$$

وتقدر ΔP_h كما يلي:

$$\Delta P_h = 1128.4 \times 9.81(-2) = -22.1 \quad \text{kPa}$$

أي إن:

$$(\Delta T_e)_h = -22.1 / 37.4 = -0.59 \quad ^\circ\text{C}$$

ويكون:

$$\Delta T_e = 0.87 - 0.59 = 0.28 \quad ^\circ\text{C}$$

أي إن درجات التبريد التحتي ستقل بمقدار ٠,٢٨°م وهي أقل من ٢°م المعطاة في بيانات المثال. مرة أخرى يمكن تصغير المقاس الاسمي للأنبوب توفيرًا للتكلفة الأولية.

٩,٧ تصميم مسار خط السحب

يصمم مسار خط السحب بحيث لا يزيد فقد الضغط خلاله عن حد السماح لفقد الضغط، وبحيث تكون سرعة بخار المبرد في الأجزاء الرأسية من الخط كافية لحمل زيت التزييت الموجود ببخار المبرد إلى الضاغط. فبزيادة فقد الضغط تزيد الطاقة المستهلكة بالضاغط وتقل سعة التبريد، وبنقص فقد الضغط يتحسن أداء الضاغط، إلا أن هذا يتطلب أنابيب ومواسير كبيرة القطر، مما يعنى

ارتفاع التكاليف الأولية. أضف إلى هذا أن انخفاض فقد الضغط نتيجة كبر قطر خط السحب يعني انخفاض سرعة البخار بخط السحب، مما يعني عدم قدرة البخار على حمل زيت التزييت معه بالأجزاء الرأسية من الخط لإعادة هذا الزيت إلى الضاغط، وبالتالي يقصر عمر الضاغط. وعليه يعتبر فقد الضغط في خط السحب وسرعة بخار المبرد في الأجزاء الرأسية لهذا الخط هما الأساسان المستخدمان لحاسب القطر الداخلي للخط، ما لم يستخدم النظام فاصل زيت عندئذ يصمم خط السحب على أساس تقليل فقد الضغط بالخط فقط.

ويراعى أيضًا عند تصميم مسار خط السحب العمل على تقليل فقد الضغط ما أمكن عن طريق تحاشي أي انحناءات لا داعي لها. كذلك يلزم أن تميل الخطوط الأفقية في اتجاه الضاغط بميل لا يقل عن ٤مم لكل متر لمساعدة عودة الزيت إلى الضاغط. ويتحدد مسار ووصلات خط السحب بناء على المعلومات الآتية:

أ) عدد المبخرات الموجودة بالنظام.

ب) الوضع النسبي لمستوى قاعدة بعض المبخرات إلى مستوى بعضها الآخر.

ج) مستوى دخول البخار للضاغط بالمقارنة بمستوى خروجه من المبخر.

د) استخدام حاكم ضخ عند إيقاف الضاغط أم لا.

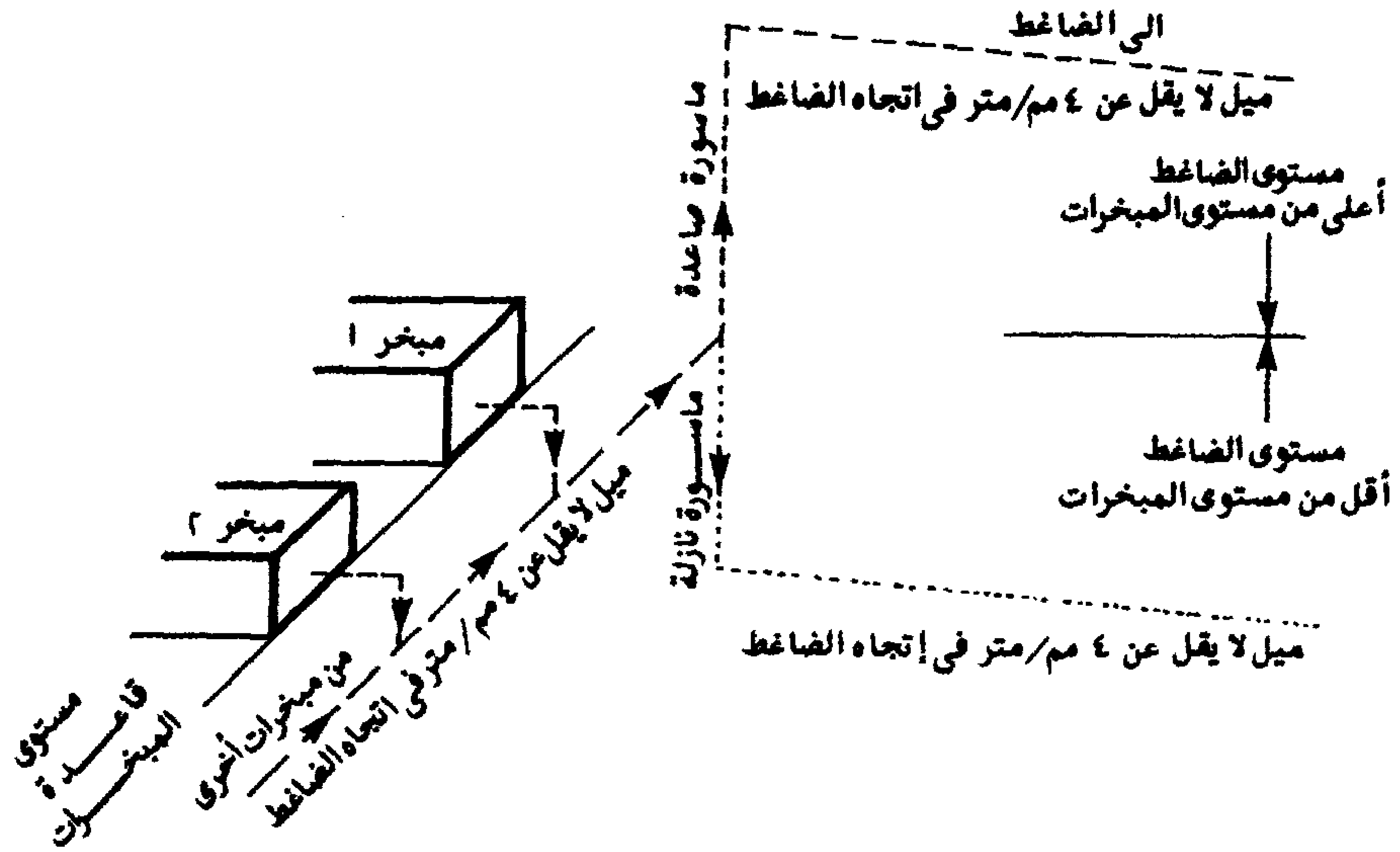
هـ) استخدام حاكم سعة تبريد أم لا.

و) عدد الضواغط الموجودة بالنظام.

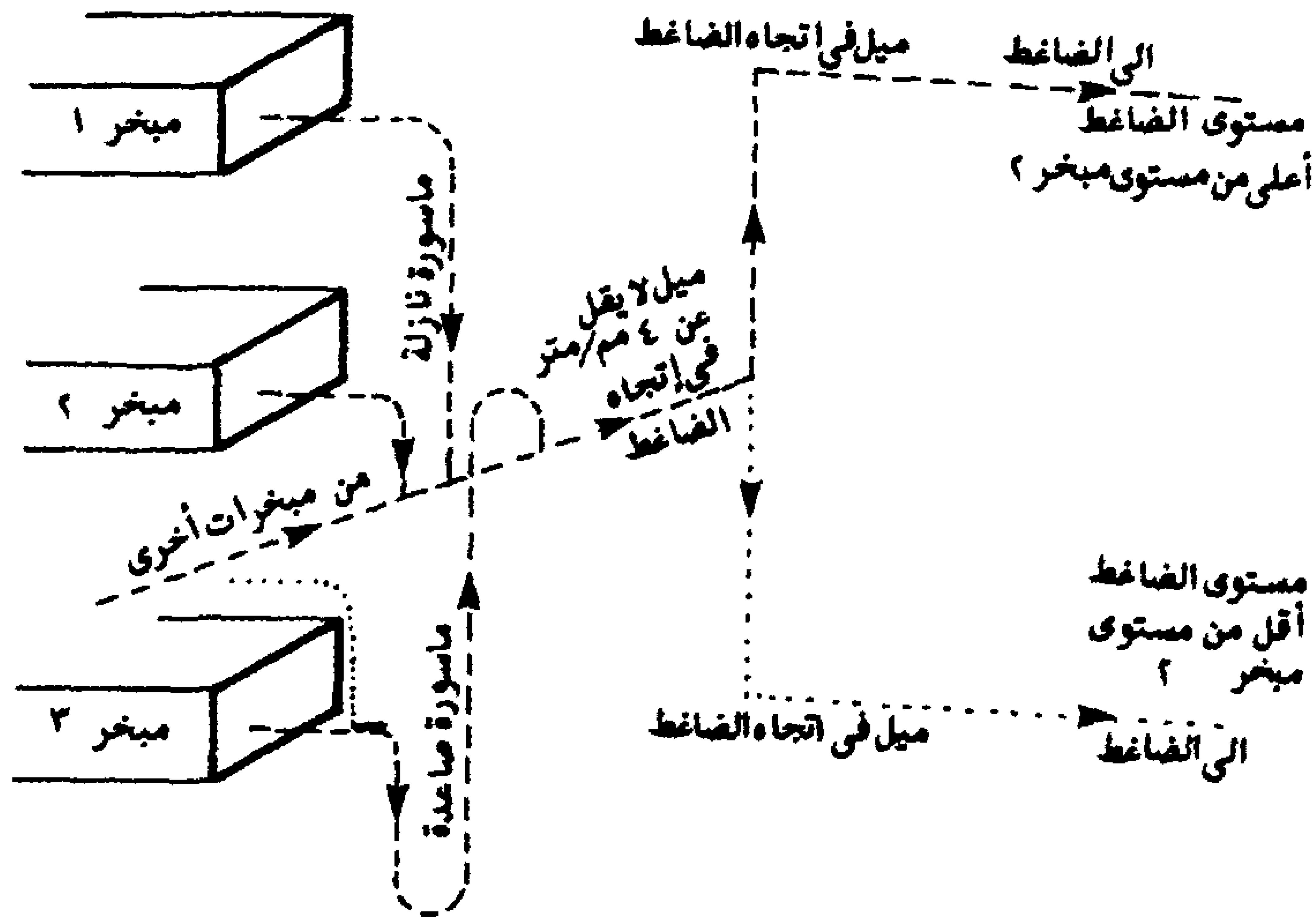
ويوضح شكل ٩,٥ رسمًا تخطيطيًا لمسار خط السحب عند خروجه من المبخر بنظام متعدد المبخرات في حالة ما إذا كان مستوى دخول البخار للضاغط أعلى أو أقل من مستوى خروجه من المبخرات. وكما هو موضح

بالرسم، يتم تجميع البخار الخارج من جميع المبخرات في خط واحد قبل تمريره إلى الماسورة الصاعدة أو الماسورة النازلة إلى وصلة خط سحب الضاغط. أما إذا كانت المبخرات عند مستويات مختلفة فيأخذ مسار خط السحب الشكل الموضح بشكل ٩,٦. وفي هذا المسار يتم أيضًا تجميع بخار المبرد القادم من جميع المبخرات في خط أفقي واحد قبل مرور هذا البخار إلى الماسورة الصاعدة أو المساورة النازلة إلى الضاغط. لاحظ الآن في الشكل الآتي: أولاً إذا كان المبخر يستخدم محبس تمدد ثرموستاتي بعيد البصيلة، كمبخر٣، فإنه لتركيب البصيلة يجب أن يأخذ مسار خط البخار من المبخر شكل مصيدة سائل (حرف U) كما هو موضح بالشكل. ثانيًا إذا كان مستوى المبخر أقل من مستوى الخط الرئيسي لسحب بخار المبخرات، فإن وصلة الماسورة الصاعدة من المبخر (مبخر٣ في الشكل) تلتقي بالخط الرئيسي بوصلة على شكل حرف U مقلوب، وذلك لمنع زيت التزييت القادم من المبخرات الأخرى من الرجوع إلى مبخر ٣، انظر الشكل ٩,٥.

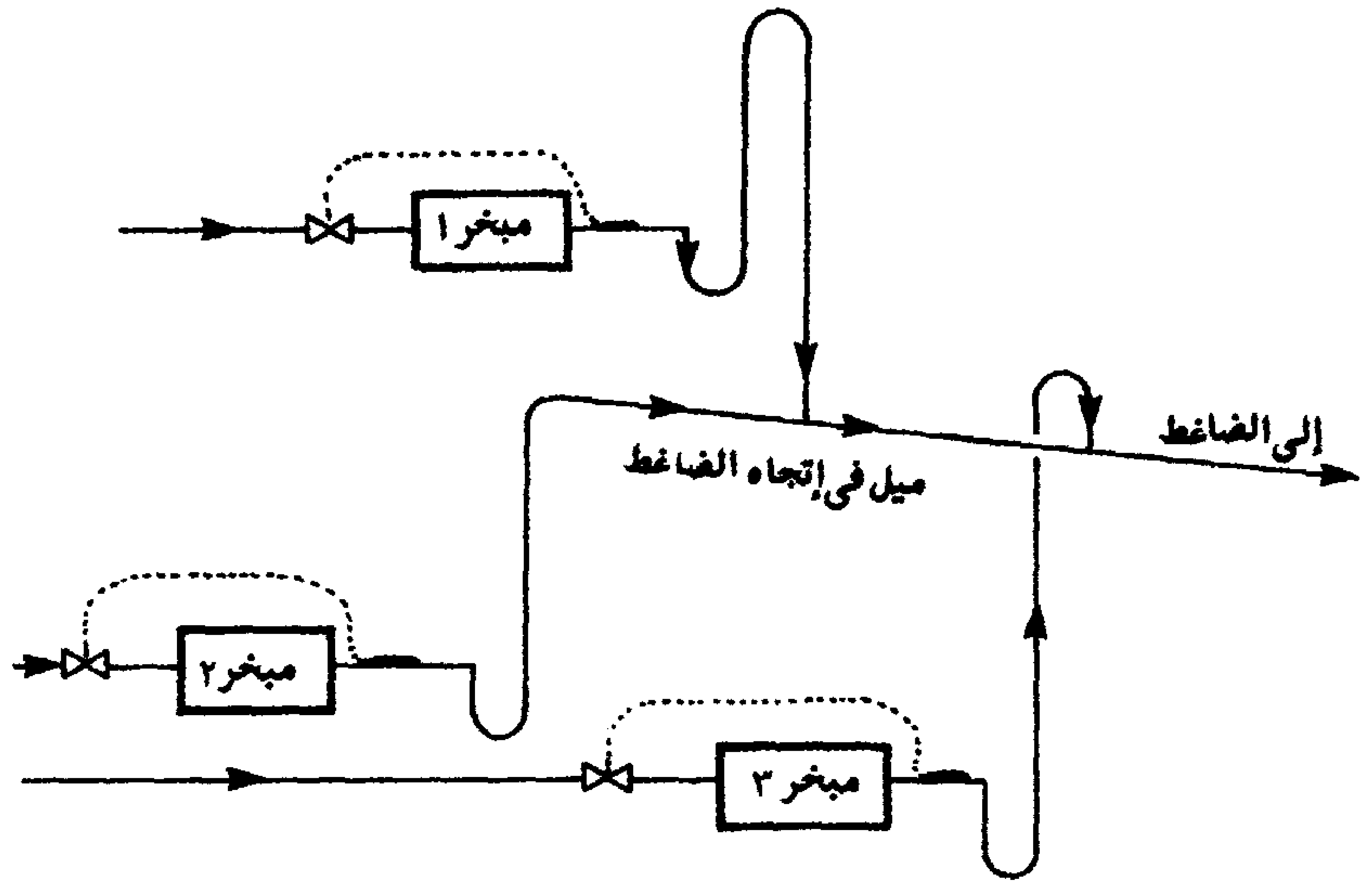
في خط السحب للمثالين الموضحين بالشكلين ٩,٥ و ٩,٦ عند مستوى ضاغط أقل من مستوى المبخرات، يتعرض الضاغط لطفح سائل المبرد من المبخرات المختلفة عند إيقاف الضاغط ثم بدء التشغيل مرة أخرى، إلا إذا كان نظام التبريد يحوي حاكم ضخ تفريغ عند إيقاف الضاغط. فإذا لم يشمل نظام التبريد هذا النوع من التحكم لزم وجود ماسورة صاعدة للبخار الخارج من أي مبخر عند مستو أعلى من مستوى الضاغط، كما هو الحال للمبخرات في شكل ٩,٧. لاحظ أيضًا في هذا الشكل وجود حرف U كمصيدة سائل لخط سحب البخار من كل مبخر لتركيب بصيلة محبس التمدد الثرموستاتي لكل مبخر.



شكل ٩,٥ مسار خط السحب لمبخرات في مستوى واحد مع بعضها البعض في حالة إذا كان مستوى الضاغط أعلى أو أقل من مستوى المبخرات.



شكل ٩,٦ مسار خط السحب لمبخرات في عدة مستويات.

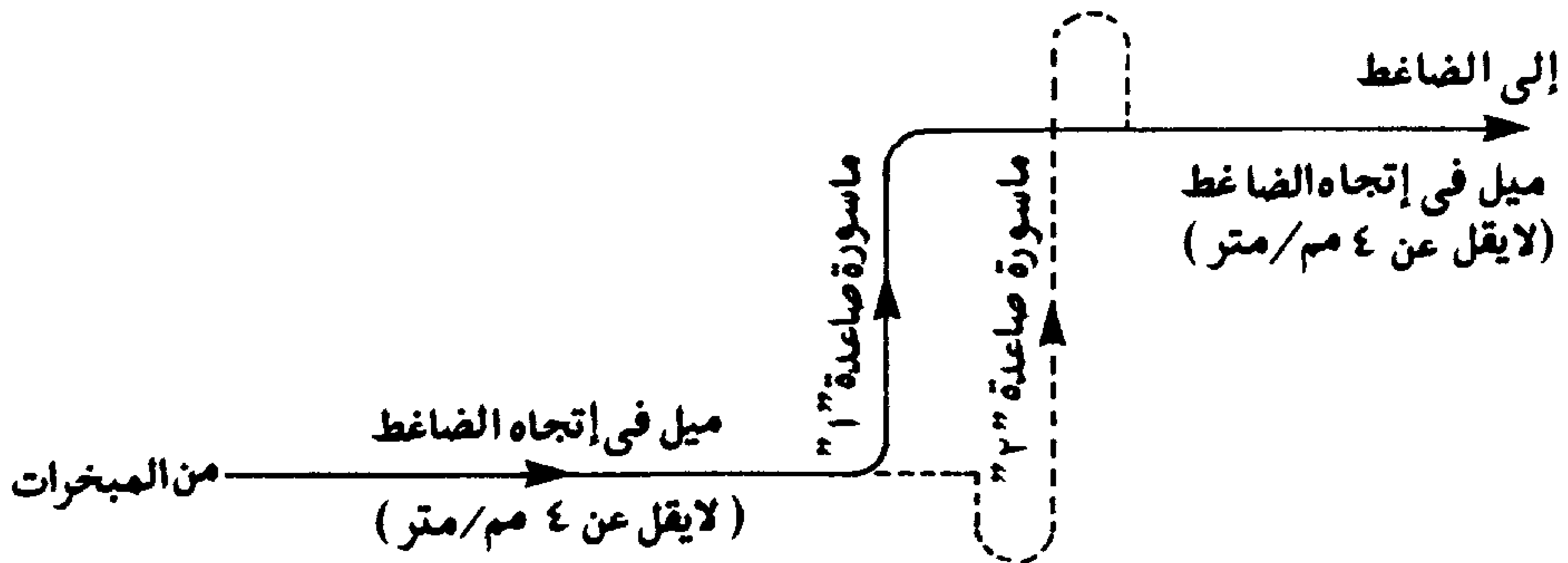


شكل ٩,٧ مسار خط السحب لعدة مبخرات في مستويات مختلفة بدون حاكم لضخ التفريغ عند إيقاف الضاغط.

في جميع الأمثلة الموضحة حتى الآن يتم تحديد قطر خط السحب الصاعد، بحيث تكون سرعة البخار بالماسورة الصاعدة كافية لسحب سائل زيت التزييت إلى أعلى لإرجاعه إلى الضاغط، ويكون هذا الشرط كافيًا لتصميم الخطوط الصاعدة في جميع نظم التبريد ما لم يحتوي النظام على حاكم سعة تبريد. فإذا احتوى نظام التبريد على مثل هذا الحاكم أمكن لبعض هذه النظم تبعًا لطريقة التحكم في سعة التبريد، من إقلال سعة التبريد حتى ١٠٪ من السعة القصوى لتبريد النظام، عندئذ ينخفض معدل سريان بخار المبرد في الخط الصاعد إلى الحد الذي يجعل سرعته غير كافية لحمل زيت التزييت إلى أعلى الماسورة الصاعدة وإرجاعه إلى الضاغط، وبالتالي تنخفض كفاءة التزييت بالضاغط مما يؤدي إلى تلفه.

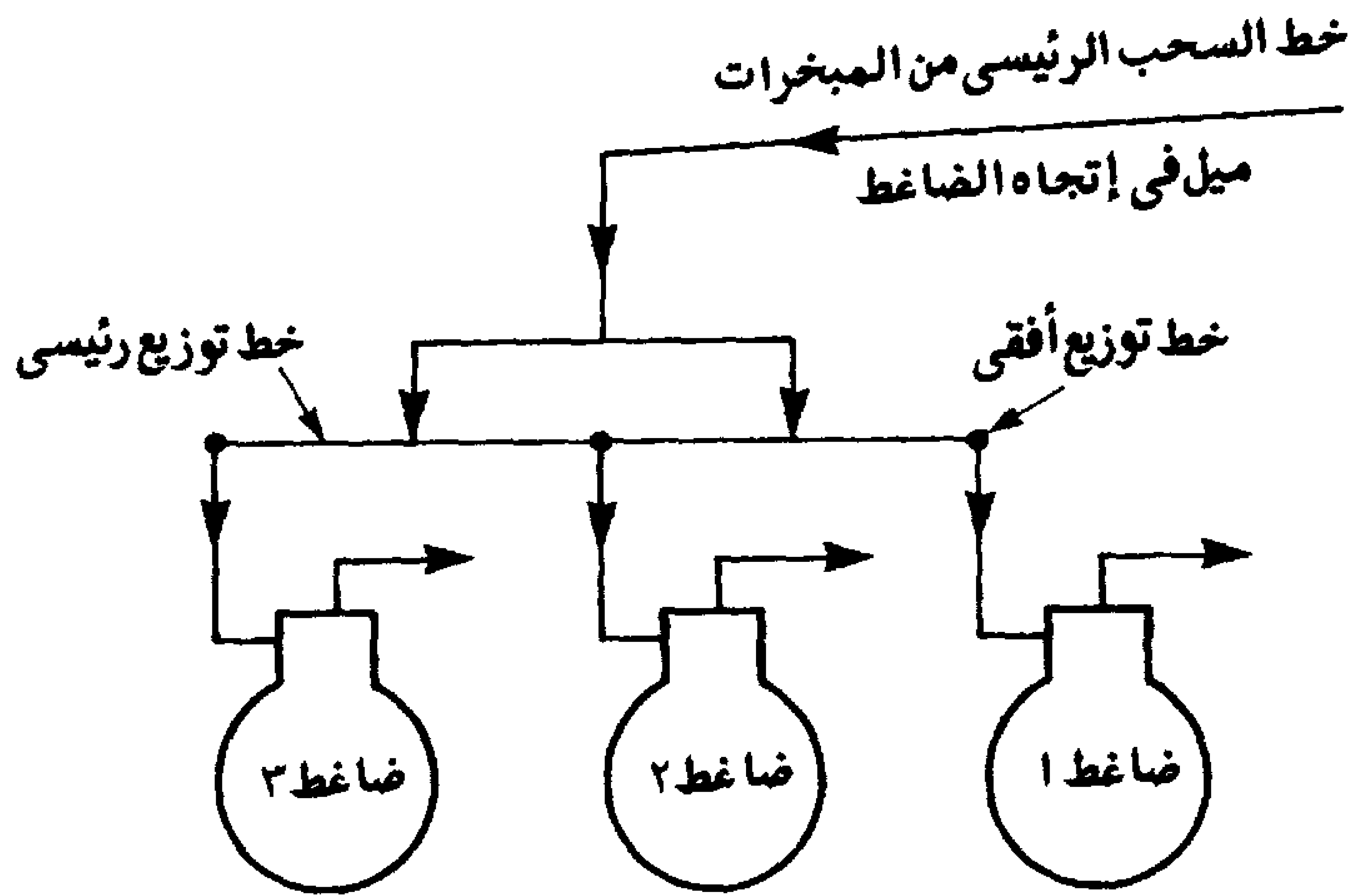
وللتغلب على هذه المشكلة يستبدل أي خط صاعد بمسار خط السحب بخط مزدوج، كما هو مبين بشكل ٩,٨. في هذه الحالة يتم حساب قطر الماسورة

الصاعدة "١" بخط السحب، بحيث تكفي سرعة البخار بها عند الحد الأدنى لسعة التبريد من حمل زيت التزييت إلى أعلى الماسورة. أما الماسورة الصاعدة "٢"، فيحسب قطرها بحيث تكون سرعة البخار المار في الماسورة الصاعدة "١"، كافية لحمل زيت التزييت إلى أعلى الماسورة "٢". فإذا انخفضت سعة التبريد بالنظام، انخفضت سرعة بخار المبرد في ماسورة "٢" إلى الحد الذي لا يمكن للبخار معه حمل الزيت إلى أعلى. عندئذ يترسب الزيت في قاع الماسورة "٢" – والتي على شكل حرف U– مما يزيد مقاومة سريان البخار في الماسورة "٢" إلى الحد الذي يمنع معه بخار المبرد من السريان في هذه الماسورة، تحول كل البخار إلى ماسورة "١"، وبهذا تكون سرعته كافية لحمل الزيت عند الحد الأدنى لسعة التبريد. ويجب مراعاة توصيل الماسورة "٢" إلى خط السحب المتجه إلى الضاغط بماسورة مقلوبة (حرف U مقلوب) لمنع عودة الزيت القادم من الماسورة الصاعدة "١" إلى الماسورة الصاعدة "٢"، كما هو موضح بشكل ٩,٨.



شكل ٩,٨ استخدام ماسورتين صاعدتين في خط السحب لضاغط أعلى من مستوى خط سحب المبخرات، ويعمل الضاغط بحاكم سعة تبريد.

ويوضح شكل ٩,٩ توصيل خط السحب من المبخرات إلى ثلاثة ضواغط متصلة على التوازي. ويراعى عند التصميم أن يكون توزيع زيت التزييت العائد إلى الضواغط متساو في المقدار، كما يراعى أن تكون ماسورة السحب الرئيسي عند التوزيع أفقية تمامًا وثابتة القطر. كما يجب أن يكون خط السحب من المبخرات عند مستو أعلى من مستوى دخول البخار إلى الضواغط حتى يمكن للزيت الرجوع إلى أعلى الضواغط المختلفة من جانب خط التوزيع لضمان تساوي توزيع الزيت إليها، كذلك يجب أن تكون هذه الفروع بنفس قطر خط التوزيع الرئيسي، وإذا لزم الأمر تصغير قطر ماسورة الفرع، فيجب أن يتم هذا عند بداية الجزء الرأسي من الفرع، وبعد انتهاء الجزء الأفقي الأولي منه.



شكل ٩,٩ توصيل خط السحب إلى ثلاثة ضواغط متصلة على التوازي.

تصمم خطوط السحب لمبرد ٢٢ بحيث لا يزيد فقد الضغط الكلي بها عن تغير درجة حرارة تشبع مكافئ قدره ١°م. وتصمم هذه الخطوط في حالة مبرد الأمونيا لتغير مكافئ قدره ٠,٥°م. وهذا هو الشرط الوحيد لتصميم أي خط سحب أفقي، أما الخطوط الرأسية الصاعدة فيشترط أن تعطي أقطارها الحد الأدنى لسرعة البخار التي تمكن البخار من حمل زيت التزييت معه إلى أعلى

الخط الصاعد في اتجاه الضاغط، إذا لم يشمل النظام فاصل زيت. ويستخدم هذا الشرط للمبردات التي تختلط بزيت التزييت، مثل مبرد ٢٢، حيث يدور زيت التزييت مع المبرد في دائرة التبريد ويعود مرة أخرى إلى الضاغط، أما في حالة الأمونيا، حيث لا تختلط الأمونيا بزيت التزييت، فيستخدم عادة فاصل زيت في خط الغاز الساخن لفصل الزيت عن الأمونيا، وبالتالي لا يمثل زيت التزييت الدائر مع الأمونيا غير نسبة ضئيلة يتم فصلها عادة في فاصل زيت يوضع بخط السحب قبل الضاغط مباشرة. وبناء على ذلك يحسب قطر خط السحب الصاعد بنظم الأمونيا بنفس طريقة حساب خط السحب الأفقي.

يجب عند تصميم خط السحب الصاعد (إن وجد) لمبرد ٢٢ في نظم التبريد التي تعمل بحاكم سعة تبريد، أن تكون سرعة بخار المبرد عند الحد الأدنى لسعة التبريد كافية لحمل زيت التزييت مع بخار المبرد إلى أعلى الخط الصاعد. ويوضح جدول ٩,٥ الحد الأدنى لسعة التبريد اللازمة لحمل زيت التزييت إلى أعلى الخط الصاعد لمبرد ٢٢. ويبين المثال التالي كيفية استخدام الجدول.

مثال ٩,٤

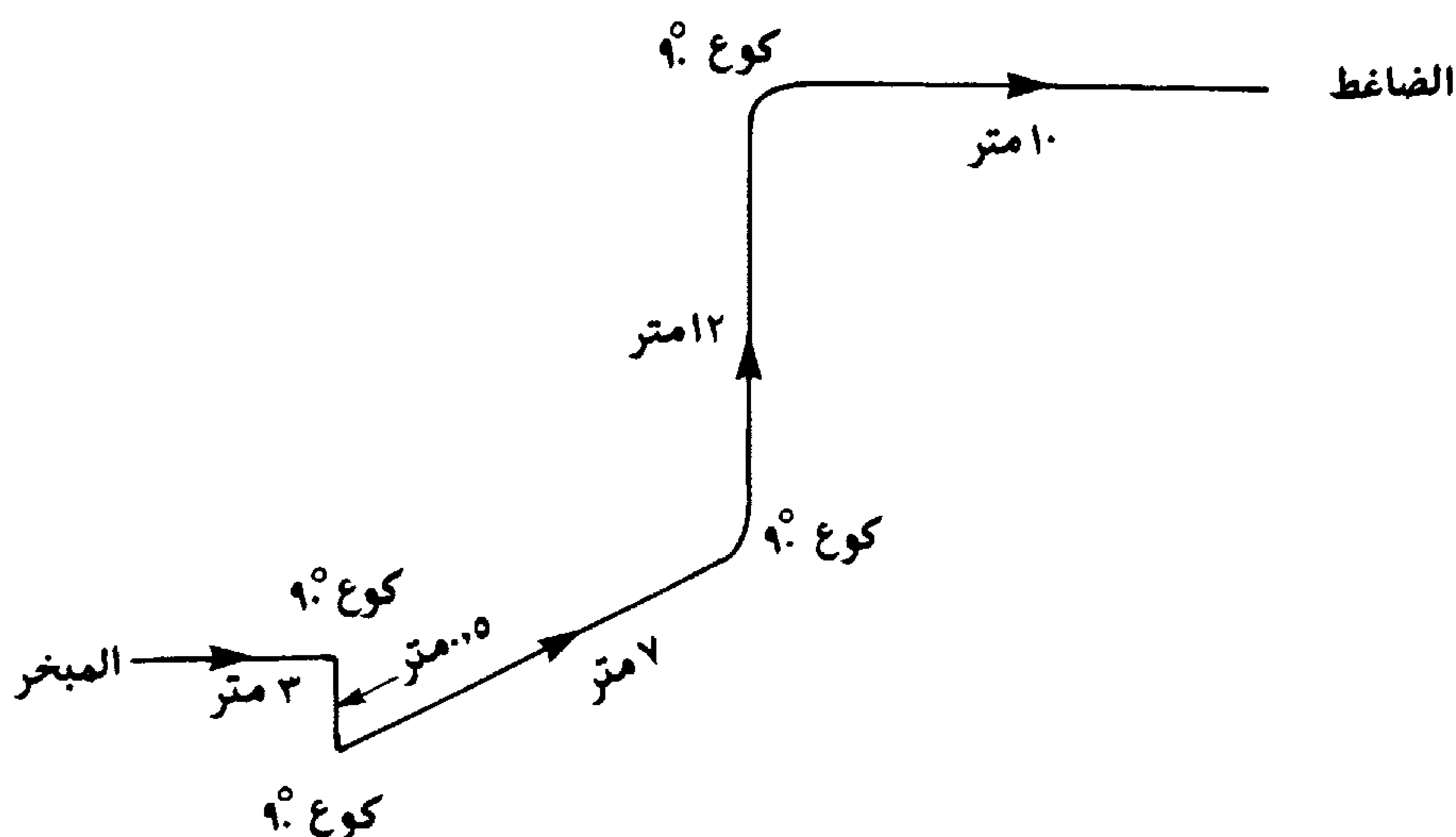
يبين شكل ٩,١٠ رسمًا تخطيطيًا بالأبعاد لخط السحب بنظام تبريد بمبرد ٢٢ بسعة تبريد قدرها ١٠٠ كيلووات وبدرجة حرارة تشبع بالمكثف قدرها ٥٠°م، ودرجة حرارة تشبع بالمبخر قدرها -٥°م. إذا كانت درجة حرارة البخار عند الدخول للضاغط تساوي ١٠°م، اختر المقاس المناسب لخط السحب. افرض أن نظام التبريد يستخدم حاكم سعة تبريد، حيث يمكن عمل نظام تبريد بخفض سعة التبريد إلى ٤٠ كيلووات.

جدول ٩,٥ أدنى سعة تبريد بالكيلوات لحمل زيت التزييت أعلى خط السحب الصاعد لأنابيب نحاس ومبرد ٢٢* [ASHRAE 1990].

درجة حرارة التشبع للمبخر (م°)	درجة حرارة غاز السحب (م°)	القطر الخارجي الاسمي (مم)											
		١٢	١٥	١٨	٢٢	٢٨	٣٥	٤٢	٥٤	٦٧	٧٩	١٠٥	١٣٠
-٤٠	-٣٥	٠,١٨٢	٠,٣٣٤	٠,٥٦١	٠,٩٥٦	١,٨١٧	٣,٢٢٣	٥,٢٠٣	٩,٩٧٧	١٤,٢٥٨	٢٦,١٥٥	٥٣,٩٦٣	٩٣,٤١٩
	-٢٥	٠,١٧٣	٠,٣١٧	٠,٥٣٢	٠,٩٠٧	١,٧٢٣	٣,٠٥٧	٤,٩٣٦	٩,٤٦٤	١٦,٣٧١	٢٤,٨١١	٥١,١٨٩	٨٨,٦١٧
	-١٥	٠,١٦٨	٠,٣٠٧	٠,٥١٦	٠,٨٨٠	١,٦٧٢	٢,٩٦٧	٤,٧٩١	٩,١٨٥	١٥,٨٨٨	٢٤,٠٨٠	٤٩,٦٨١	٨٦,٠٠٦
-٢٠	-١٥	٠,٢٨٧	٠,٥٢٧	٠,٨٨٥	١,٥٠٨	٢,٨٦٧	٥,٠٨٧	٨,٢١٣	١٥,٧٤٨	٢٧,٢٣٩	٤١,٢٨٣	٨٥,١٧٣	١٤٧,٤٤٩
	-٥	٠,٢٧٣	٠,٥٠١	٠,٨٤١	١,٤٣٣	٢,٧٢٤	٤,٨٣٤	٧,٨٠٤	١٤,٩٦٣	٢٥,٨٨٢	٣٩,٢٢٦	٨٠,٩٢٩	١٤٠,١٠٢
	٥	٠,٢٦٤	٠,٤٨٥	٠,٨١٥	١,٣٨٨	٢,٦٣٨	٤,٦٨٠	٧,٥٥٥	١٤,٤٨٧	٢٥,٠٥٨	٣٧,٩٧٧	٧٨,٣٥٣	١٣٥,٦٤٢
-٥	٠	٠,٣٨٩	٠,٧١٣	١,١٩٨	٢,٠٤١	٣,٨٧٩	٦,٨٨٣	١١,١١٢	٢١,٣٠٦	٣٦,٨٥٤	٥٥,٨٥٦	١١٥,٢٤٠	١٩٩,٤٩٩
	١٠	٠,٣٦٩	٠,٦٧٦	١,١٣٦	١,٩٣٥	٣,٦٧٨	٦,٥٢٦	١٠,٥٣٥	٢٠,٢٠٠	٣٤,٩٤٠	٥٢,٩٥٤	١٠٩,٢٥٤	١٨٩,١٣٦
	٢٠	٠,٣٥٤	٠,٦٥٠	١,٠٩٢	١,٨٦١	٣,٥٣٧	٦,٢٧٥	١٠,١٣١	١٩,٤٢٥	٣٣,٦٠٠	٥٠,٩٢٤	١٠٥,٠٦٥	١٨١,٨٨٤
٥	١٠	٠,٤٧٠	٠,٨٦٢	١,٤٤٩	٢,٤٦٨	٤,٦٩٢	٨,٣٢٥	١٣,٤٤١	٢٥,٧٧١	٤٤,٥٧٧	٦٧,٥٦٠	١٣٩,٣٨٧	٢٤١,٣٠٢
	٢٠	٠,٤٤٠	٠,٨٠٧	١,٣٥٦	٢,٣١١	٤,٣٩٣	٧,٧٩٤	١٢,٥٨٢	٢٤,١٢٦	٤١,٧٣١	٦٣,٢٤٦	١٣٠,٤٨٨	٢٢٥,٨٩٦
	٣٠	٠,٤٢٢	٠,٧٧٤	١,٣٠١	٢,٢١٧	٤,٢١٣	٧,٤٧٦	١٢,٠٦٩	٢٣,١٤١	٤٠,٠٢٧	٦٠,٦٦٥	١٢٥,١٦١	٢١٦,٦٧٥

*القيم في الجدول (٩,٥) على أساس درجة حرارة التشبع في المكثف ٤٠°م، عند اختلافها عن هذه القيمة تضرب قيم الجدول في عامل التصحيح F الآتي:

المبرد	درجة حرارة السائل		
	٢٠°م	٣٠°م	٥٠°م
مبرد ٢٢	١,١٧	١,٠٨	٠,٩١
مبرد ١٣٤أ	١,٢٠	١,١٠	٠,٨٩
مبرد ٥٠٢	١,٢٦	١,١٢	٠,٨٦



شكل ٩,١٠ رسم تخطيطي لخط السحب لمثال ٩,٤.

الحل

باستخدام جدول ٩,٣ عند درجة حرارة تشبع قدرها -٥°م بخط السحب وباختيار أنبوبًا نحاسيًا بقطر اسمي قدره ٥٤ مم، نجد أن سعة التبريد بالجدول تساوى ٨٩,٦٩ كيلووات. يؤخذ معامل التصحيح لدرجة حرارة المكثف من أسفل الجدول، عندئذ تصحح قيمة سعة التبريد من الجدول كما يلي:

$$\dot{Z}_t = 0.91 \times 89.69 = 81.6 \quad \text{kW}$$

نحسب الطول المكافئ لخط السحب كما يلى:

$$L_e = L + 4L_{90^o\ elbow}$$
$$= (3+0.5+7+12+10)+4\times 1.6 = 38.9\ \text{m}$$

يقدر التغير في درجة حرارة التشبع المكافئ لفقد الضغط من معادلة (9.9) كما يلي:

$$\Delta T = 0.04\times 38.9\times (\frac{100}{81.6})^{1.8} = 2.24\ \ ^\circ\text{C}$$

أي تزيد ΔT عن ١°م، وبالتالي يجب اختيار مقاسًا أكبر لخط السحب. نختار الآن أنبوبا بقطر اسمي قدره ٦٧ مم، فنحصل على الآتي:

$$\dot{Z}_t = 0.91\times 159.5 = 145.1$$
$$L_e = 32.5 + 4\times 1.9 = 40.1$$
$$\Delta T = 0.04\times 40.1\,(\frac{100}{145.1})^{1.8} = 0.82\ \ ^\circ\text{C}$$

أي تقل ΔT عن ١°م وبالتالي يكون هذا المقاس لخط السحب مناسبًا.

ندرس الآن ملائمة قطر خط السحب في الجزء الصاعد منه لحمل زيت التزييت إلى أعلى عندما يعمل نظام التبريد عند الحد الأدنى لسعة التبريد، أي عند ٤٠ كيلووات. بالرجوع إلى جدول ٩,٥ نجد أن الحد الأدنى لسعة التبريد اللازمة لحمل زيت التزييت إلى أعلى خط السحب هي ٣٤,٩٤ كيلووات، أي أقل من ٤٠ كيلووات، وذلك عند استخدام أنبوبا نحاسيًا مقاسه الاسمي هو ٦٧ مم. ومن هذا نجد أن مقاس الأنبوب مناسبًا.

٩,٨ تصميم مسار خط الغاز الساخن

يحمل الغاز الساخن الخارج من الضاغط بعض قطرات زيت التزييت معه، ولا يمكن عمليًا الحد من ذلك، لذا يصمم خط الغاز الساخن – كما هو الحال في خط السحب– بحث يكون فقد الضغط في هذا الخط أقل ما يمكن،

ولكن إلى الحد الذي تكفي معه سرعة البخار على حمل قطرات الزيت المحمولة بالبخار إلى المكثف ومنع عودتها إلى الضاغط من خلال صمام الطرد، وذلك لحماية الضاغط. ويلزم على المصمم التوفيق بين فقد الضغط وسرعة البخار في الخطوط الصاعدة من الخط لضمان كفاءة تصميم خط الغاز الساخن. ويتم هذا عن طريق مراعاة الآتي، بالإضافة إلى حساب القطر الداخلي الأمثل للخط:

أ) ألا يوجد بالخط أي تعرجات أو دورانات لا داعي لها، مما يزيد من فقد الضغط بالخط.

ب) أن تميل الأجزاء الأفقية لخط الغاز الساخن في اتجاه سريان الغاز- أي في اتجاه المكثف - بما لا يقل عن ٤ مم لكل متر طولي، وذلك لمنع عودة قطرات زيت التزييت إلى صمام الطرد بالضاغط.

ج) أن يوجد مصيدة سائل بالقرب من خروج البخار من الضاغط، وذلك لمنع ارتداد زيت التزييت، وكذلك قطرات سائل المبرد المتكثف في خط الغاز الساخن، إلى الضاغط مرة أخرى.

ويعتمد مسار خط الغاز الساخن على بدائل التصميم الآتية:

أ) مستوى الخروج من الضاغط بالمقارنة بمستوى الدخول للمكثف.

ب) وجود أو عدم وجود حاكم للتحكم في سعة التبريد بنظام التبريد.

ج) وجود أو عدم وجود فاصل زيت بنظام التبريد.

د) عدد الضواغط الموجودة بنظام التبريد.

هـ) عدد المكثفات المستخدمة بنظام التبريد.

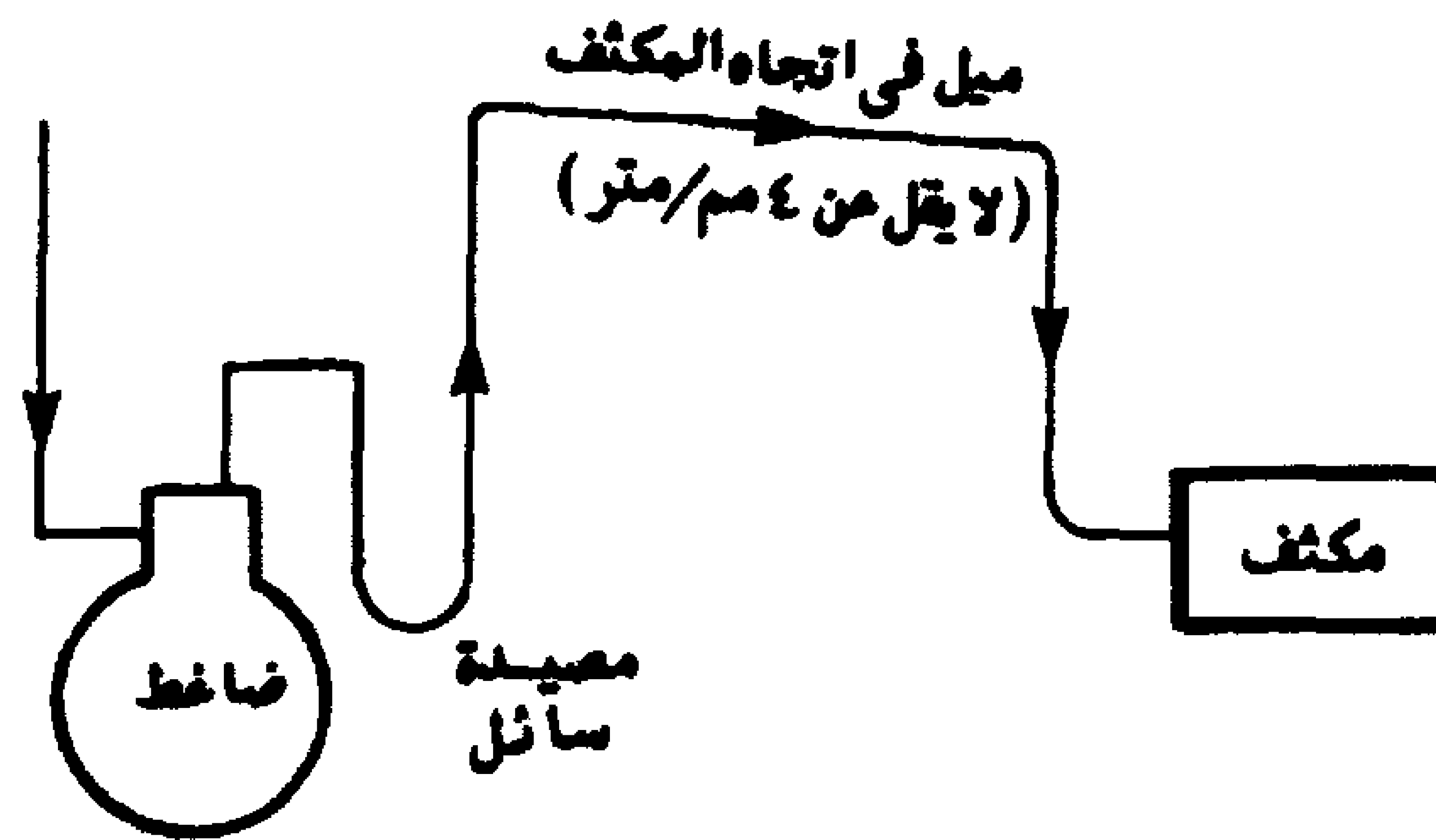
وفيما يلي سنوضح كيفية تصميم مسار الغاز الساخن في بدائل التصميم السابقة.

يوضح شكلا ٩,١١ و ٩,١٢ مسار خط الغاز الساخن تبعًا لاختلاف مستوي الضاغط والمكثف. فإذا كان مستوى الضاغط والمكثف متقاربًا كما هو موضح في شكل ٩,١١ (أ) لزم وضع خط صـــاعد لا يزيد عادة عن ٢,٥ مـــتر كشرط لضمان عدم ارتداد أي سائل للمبرد أو نقط زيت التزييت إلى الضاغط مرة أخرى. لاحظ هنا أيضًا وجود خط نازل للوصول إلى مستوى المكثف، وكذلك وجود مصيدة السائل بالقرب من خروج الضاغط، بالإضافة إلى ميل الخط في اتجاه المكثف. أما إذا كان مستوى المكثف أعلى من مستوى الضاغط، كما هو موضح بالرسم (ب) بنفس الشكل، فتحذف الماسورة النازلة فقط ويطول الخط الصاعد للوصول إلى مستوى المكثف. ويجب مراعاة وضع مصيدة سائل كل ٧,٥ متر من طول الخط الصاعد نظرًا لزيادة احتمال تساقط قطرات الزيت كلما زاد طول الخط الصاعد، وتكون شكل هذه المصيدة على شكل حرف U أحدهما في الوضع الطبيعي والأخرى مقلوبة، كما هو موضح بشكل ٩,١٢.

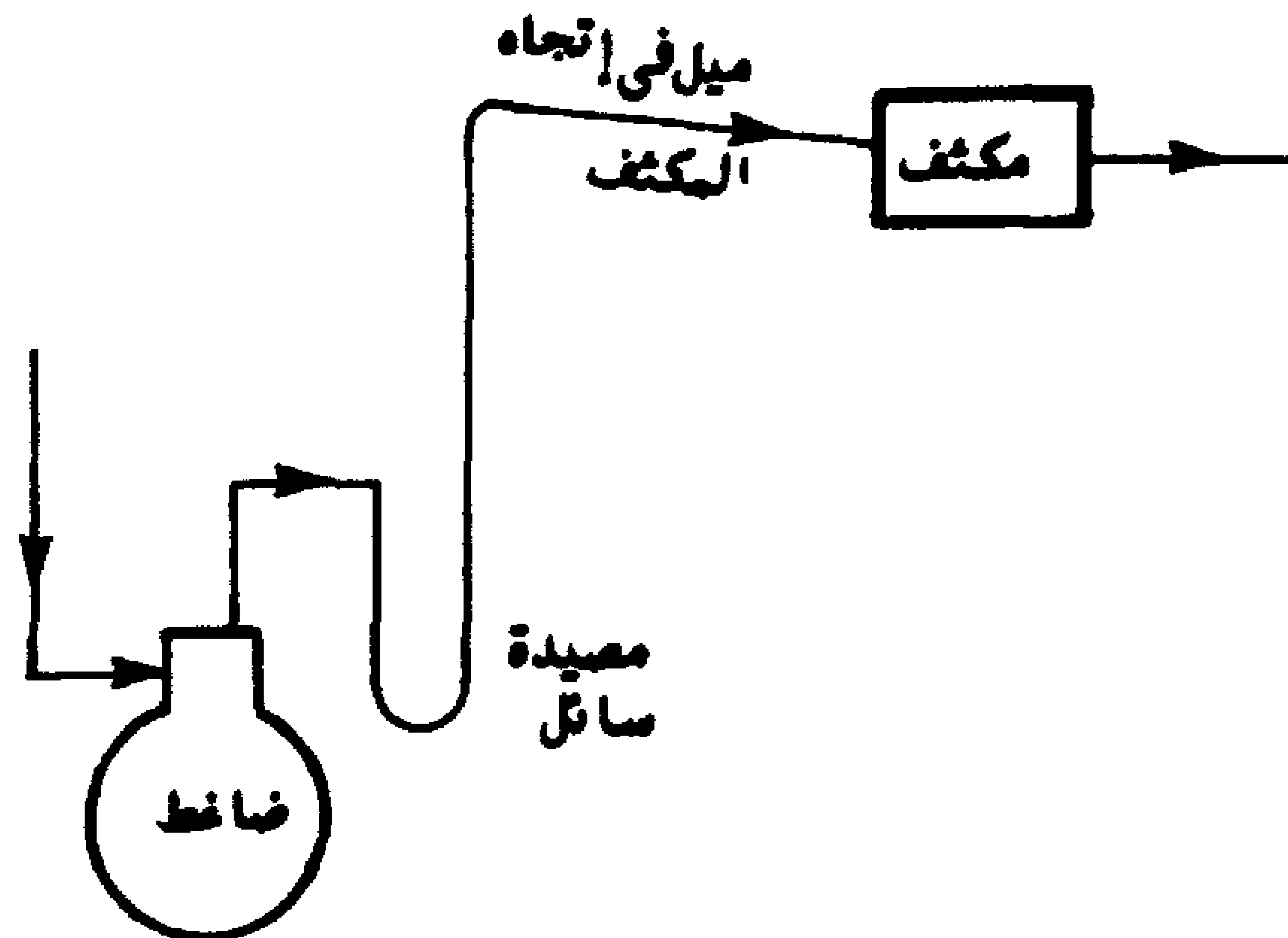
وكما سبق أن قدمنا في تصميم مسار خط السحب، يخشى في نظم التبريد المستخدمة لحاكم تحكم في سعة التبريد أن تنخفض سرعة البخار في الخط الصاعد- نتيجة انخفاض سعة التبريد- إلى الحد الذي لا يمكّن البخار من حمل زيت التزييت إلى أعلى الخط الصاعد. عندئذ يستخدم خط صاعد مزدوج، كما هو الحال عند تصميم خط السحب، وتكون فكرة عمل هذا الخط كما قدمنا سابقًا في تصميم خط السحب. ويوضح شكل ٩,١٣ مسار خط الغاز الساخن في هذه الحالة.

ويفضل في العديد من نظم التبريد استخدام فاصل زيت في خط الغاز الساخن، ومن هذه النظم على سبيل المثال: النظم التي تعمل عند درجات حرارة

منخفضة نسبيًا، والنظم التي تستخدم بعض أنواع المبخرات التي لا تساعد على إرجاع الزيت إلى الضاغط، كالمبخرات المغمورة، أو النظم التي بها حاكم تحكم سعة ويصعب استخدام خط مزدوج صاعد في خط الغاز بها، وغيرها من النظم. وفي هذه الحالة يصمم خط الغاز الساخن بحيث تميل الأنابيب الأفقية بالخط إلى اتجاه فاصل الزيت كما هو موضح بشكل ٩,١٤.

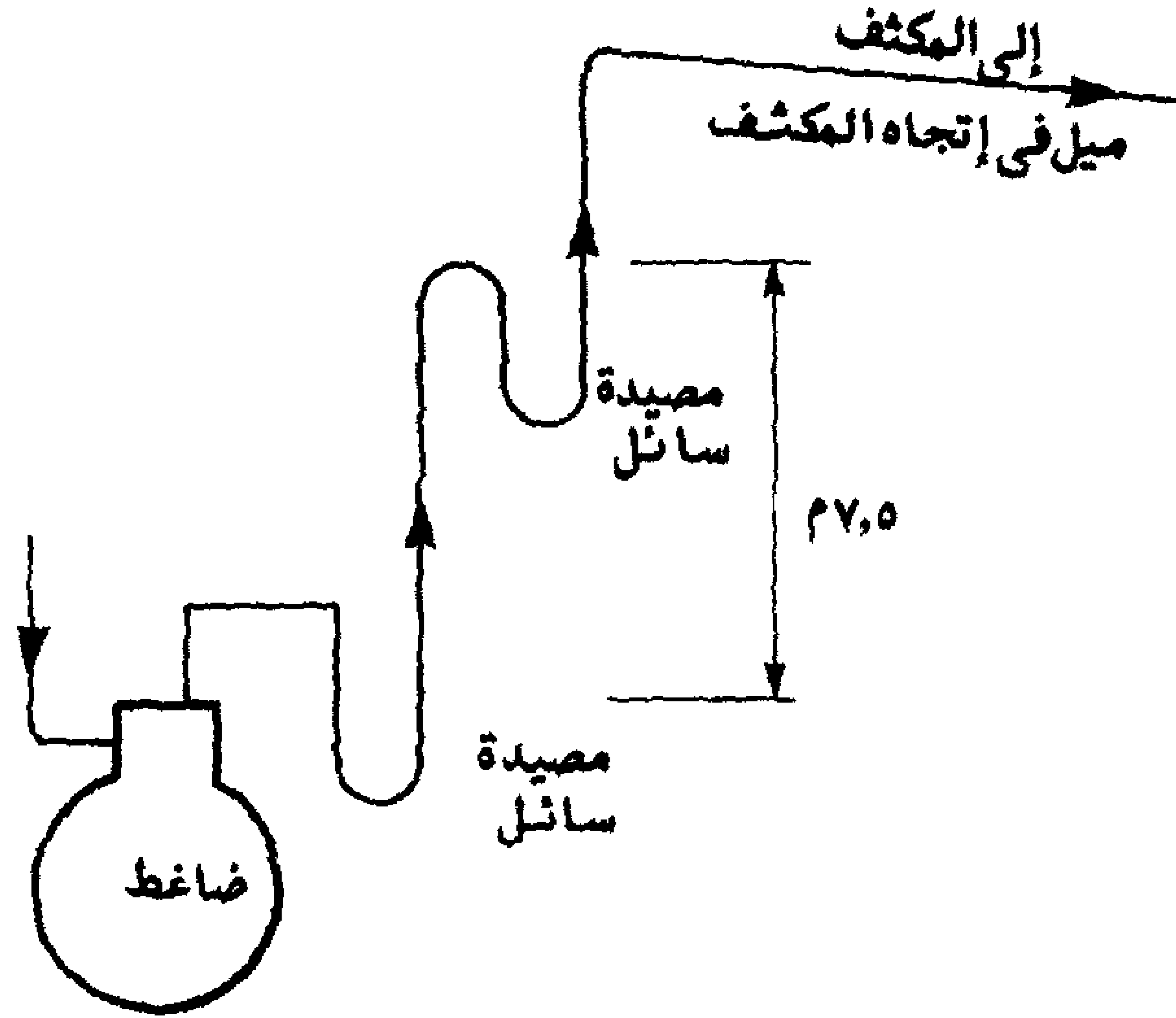


(أ) مستوى المكثف في مستوى الضاغط

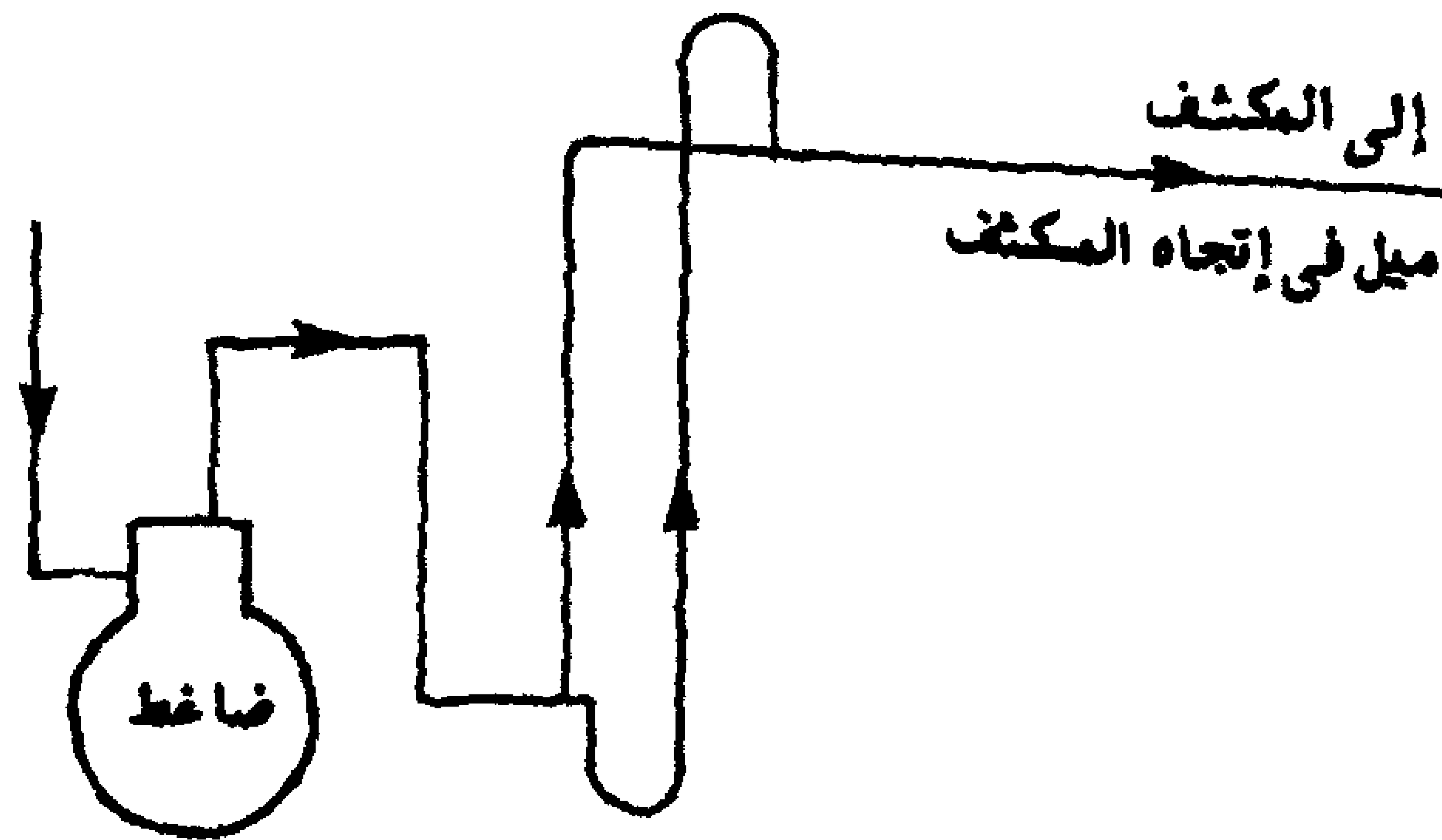


(ب) مستوى المكثف أعلى من مستوى الضاغط

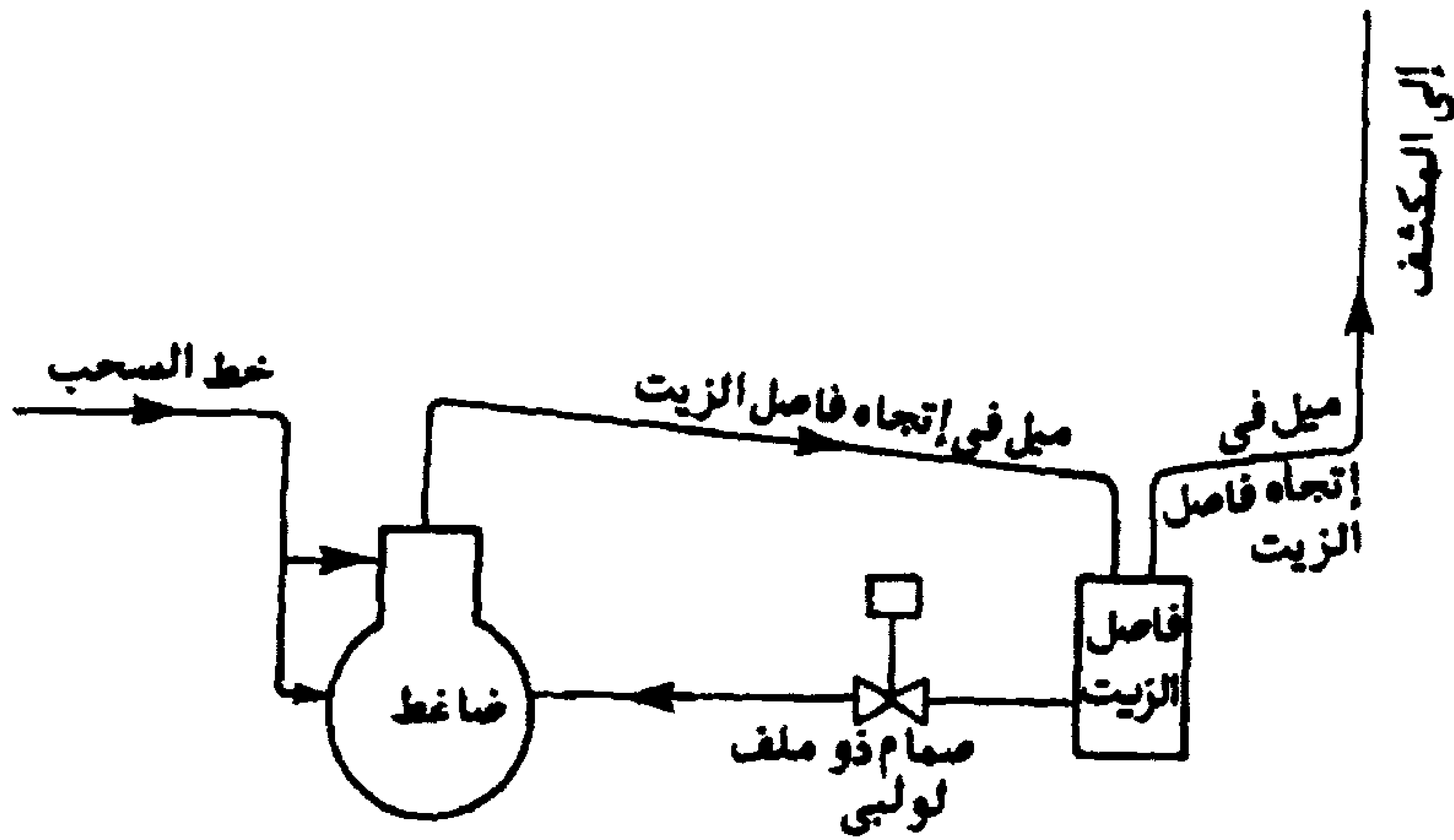
شكل ٩,١١ مسار الخط الساخن لمكثف عند مستوي الضاغط أو أعلى منه.



شكل ٩,١٢ مسار الخط الساخن لمكثف أعلى من الضاغط بمسافة راسية تزيد عن ٧,٥ متر وتقل عن ١٥ مترًا.



شكل ٩,١٣ استخدام ماسورتين صاعدتين بالخط الساخن لنظام تبريد به حاكم سعة.



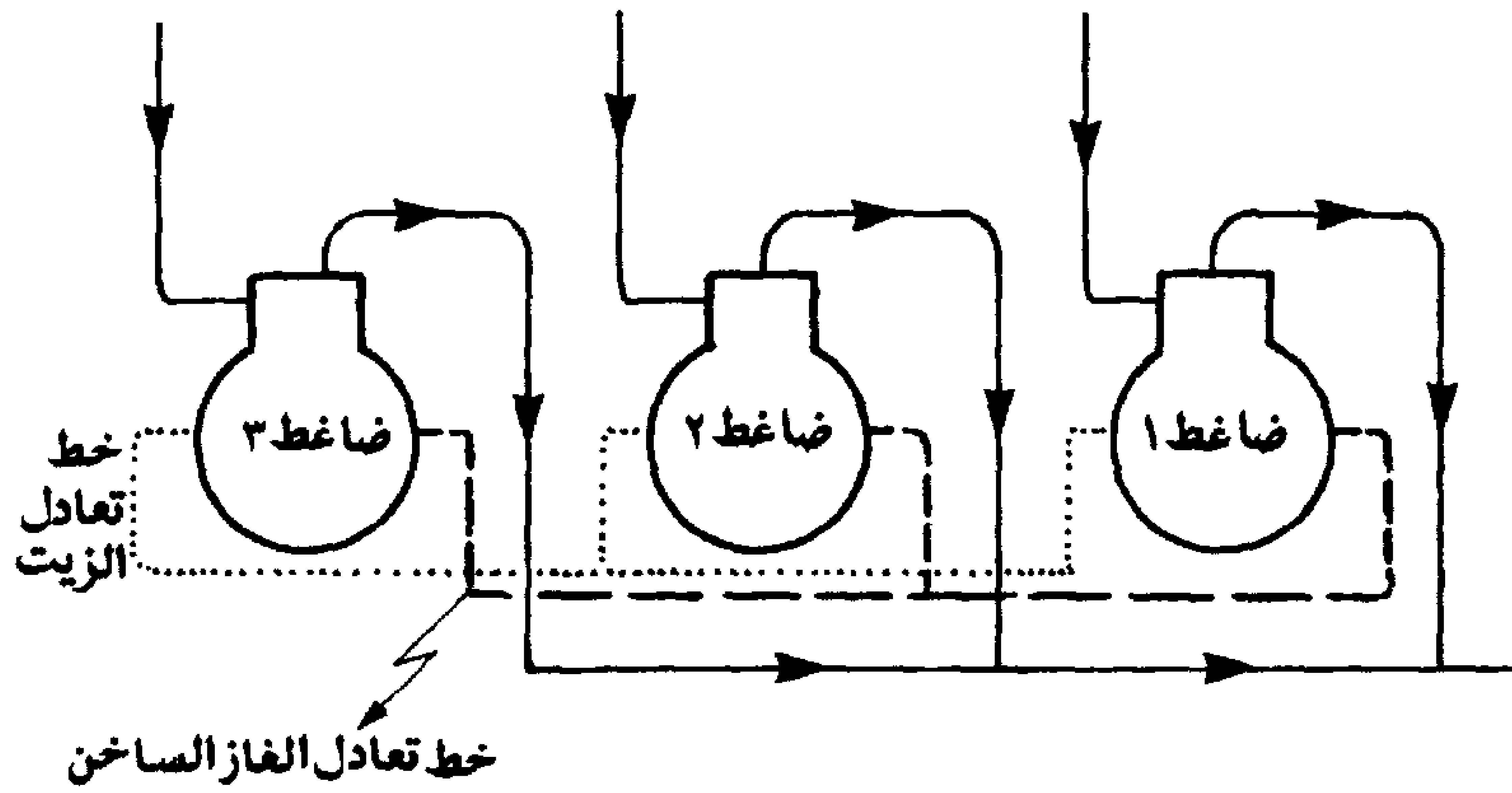
شكل ٩,١٤ مسار الخط الساخن باستخدام فاصل زيت.

كما يلزم أيضًا توصيل فاصل الزيت بحوض مرافق الضاغط بخط لإعادة الزيت إلى الضاغط. ويركب على هذا الخط صمام ذو ملف لولبي للتحكم في سريان الزيت إلى الضاغط تبعًا لمستوى هذا الزيت بحوض مرافق الضاغط.

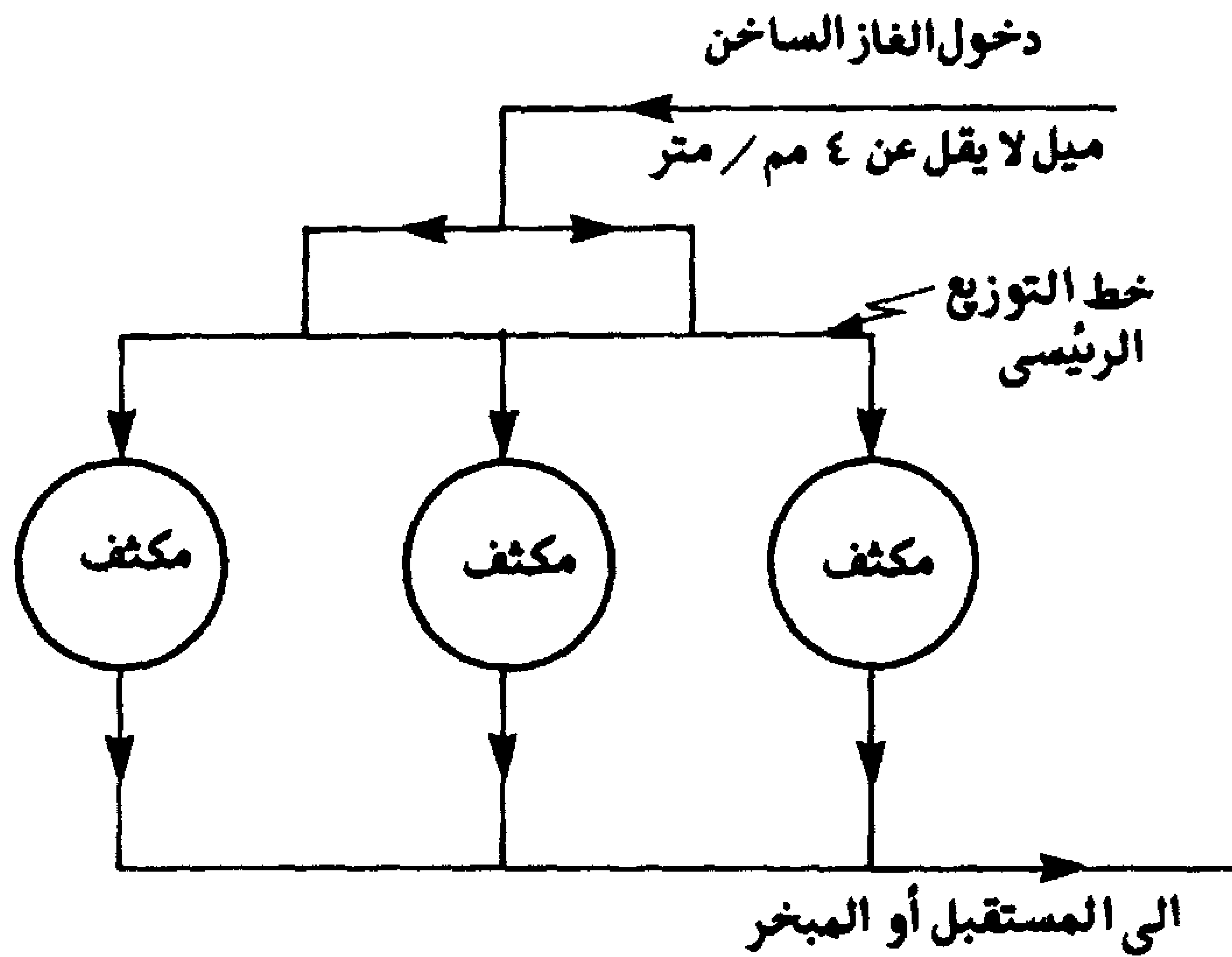
يوضح شكل ٩,١٥ مسار الغاز الساخن عند الخروج من عدة ضواغط متصلة على التوازي. وكما هو موضح بالشكل يجب توصيل هذه الضواغط على خط رئيسي عند مستوى أقل من مستوى الخروج من الضواغط لمنع ارتداد زيت التزييت إلى الضواغط. كما يلزم أيضًا توصيل خط خارجي لتعادل الغاز الساخن في أحواض مرافق الضواغط لضمان عدم اندفاع الزيت في أحد هذه الضواغط بمعدل أكبر من الضواغط الأخرى. كما يجب أيضا توصيل أحواض مرافق الضواغط بخط خارجي لتعادل زيت التزييت لضمان مستوى زيت متساو في هذه الأحواض.

يوضح شكل ٩,١٦ توصيل خط الغاز الساخن إلى ٣ مكثفات متصلة على التوازي. ويجب في هذه الحالة أن يكون خط الغاز الساخن مائلا في اتجاه المكثفات، أما خط التوزيع الرئيسي فيجب أن يكون أفقيًا تمامًا لعدالة توزيع الغاز الساخن بين المكثفات المختلفة. أيضًا يجب أن يؤخذ في الاعتبار عند

تصميم هذه الوصلات أن يوزع الغاز الساخن على المكثفات المختلفة بالتساوي لأفضل استفادة من سطح انتقال الحرارة بكل مكثف.



شكل ٩,١٥ مسار خط الغاز الساخن لعدة ضواغط متصلة على التوازي. يوضح الرسم أيضا خط تعادل الغاز الساخن وكذلك خط تعادل الزيت لأحواض المرافق للضواغط.



شكل ٩,١٦ توصيل خط الغاز الساخن إلى عدة مكثفات متصلة على التوازي.

يحسب قطر خط الغاز الساخن بنفس طريقة حساب قطر خط السحب، أي أن يكون فقد الضغط في الخط أقل من حد السماح لفقد الضغط. ويؤخذ حد السماح مكافئًا لتغير في درجة حرارة التشبع قدره ٠,٥°م لمبرد ٢٢ وللأمونيا. على أن هذا ليس هو الشرط الوحيد، فيجب أيضًا أن تكون سرعة الغاز بأي خط صاعد كافية لحمل زيت التزييت إلى أعلى الخط الصاعد، لحماية الضاغط. وكما بينا سابقًا، لا ينطبق هذا الشرط عند استخدام الأمونيا كمبرد حيث يركب فاصل زيت بخط الغاز الساخن في أبعد نقطة ممكنة عن الضاغط.

ويوضح جدول ٩,٦ الحد الأدنى لسعة التبريد التي تعطي سرعة غاز كافية لحمل الزيت أعلى خط الغاز الساخن الصاعد. وفي المثال التالي نبين كيفية حساب قطر خط الغاز الساخن.

مثال ٩,٥

احسب قطر خط الغاز الساخن بدائرة تبريد تعمل عند نفس المواصفات المعطاة بمثال ٩,٤، علمًا بأن درجة حرارة الغاز الساخن الخارج من الضاغط هي ٩٠°م وطول الخط المكافئ هو ٣٠ مترًا منها ٧ أمتار طول الخط الصاعد.

الحل

من جدول ٩,٣ عند درجة حرارة تشبع بخط الطرد قدرها –٥°م باستكمال الجدول خطيًا، وخط مقاس ٤٢ مم، فإن سعة التبريد بالجدول تكون ٨٧,٨ كيلووات. ويقدر التغير في درجة حرارة التشبع المكافئ لفقد الضغط من معادلة (9.7) كما يلي:

$$\Delta T = 0.02 \times 30 \times \left(\frac{100}{87.8 \times 1.11}\right)^{1.8} = 0.63 \quad ^{\circ}\mathrm{C}$$

جدول ٩,٦ أدنى سعة تبريد بالكيلوات لحمل زيت التزييت أعلى خط الغاز الساخن الصاعد لأنابيب نحاس و مبرد ٢٢ ° [ASHRAE 1990].

درجة حرارة التشبع للمكثف (°م)	درجة حرارة غاز السحب (°م)	القطر الخارجي الاسمي (مم)											
		١٢	١٥	١٨	٢٢	٢٨	٣٥	٤٢	٥٤	٦٧	٧٩	١٠٥	١٣٠
٢٠	٦٠	٠,٥٦٣	٠,٠٣٢	٠,٧٣٥	٢,٩٥٦	٥,٦١٩	٩,٩٦٩	١٦,٠٩٤	٣٠,٨٥٩	٤٣,٣٧٧	٨٠,٨٩٧	١١٦,٩٠٤	٢٨٨,٩٣٨
	٧٠	٠,٥٤٩	١,٠٠٦	١,٦٩١	٢,٨٨١	٥,٤٧٧	٩,٧١٧	١٥,٦٨٧	٣٠,٠٧٨	٥٢,٠٢٧	٤٨,٨٥١	١٦٢,٦٨٢	٢٨١,٦٣٠
	٨٠	٠,٥٣٥	٠,٩٨٢	١,٦٥٠	٢,٨١١	٥,٣٤٣	٩,٤٨٠	١٥,٣٠٥	٢٩,٣٤٦	٥٠,٧٦١	٧٦,٩٣٣	١٥٨,٧٢٦	١٧٣,٧٨٠
٣٠	٧٠	٠,٥٩٦	١,٠٩٢	١,٨٣٦	٣,١٢٧	٥,٩٤٥	١٠,٥٤٧	١٧,٠٢٨	٣٢,٦٤٩	٥٦,٤٧٤	٨٥,٥٩١	١٧٦,٥٨٨	٣٠٥,٧٠٢
	٨٠	٠,٥٧٩	١,٠٦٢	١,٧٨٥	٣,٠٤٠	٥,٧٧٩	١٠,٢٥٤	١٦,٥٥٤	٣١,٧٤٠	٥٤,٩٠١	٨٣,٢٠٨	١٧١,٦٧١	٢٩٧,١٩٠
	٩٠	٠,٥٦٥	٠,٠٣٥	١,٧٤٠	٢,٩٦٤	٥,٦٣٥	٩,٩٩٨	١٦,١٤٠	٣٠,٩٤٨	٥٣,٥٣١	٨١,١٣١	١٦٧,٣٨٦	٢٨٩,٧٧٣
٤٠	٨٠	٠,٦١٨	١,١٣٢	١,٩٠٣	٣,٢٤٢	٦,١٦٣	١٠,٩٣٤	١٧,٦٥٣	٣٣,٨٤٧	٥٨,٥٤٦	٨٨,٧٣٢	١٨٣,٠٦٩	٣١٦,٩٢٢
	٩٠	٠,٦٠١	١,١٠٣	١,٨٥٣	٣,١٥٧	٦,٠٠١	١٠,٦٤٧	١٧,١٨٩	٣٢,٩٥٩	٤٧,٠٠٩	٨٦,٤٠٣	١٧٨,٢٦٣	٣٠٨,٦٠٣
	١٠٠	٠,٥٨٤	١,٠٧١	١,٨٠٠	٣,٠٦٧	٥,٨٣٠	١٠,٣٤٣	١٦,٦٩٨	٣٢,٠١٨	٥٥,٣٨٢	٨٣,٩٣٦	١٧٣,١٧٣	٢٩٩,٧٩١
٥٠	٩٠	٠,٦٣٠	١,١٥٦	١,٩٤٣	٣,٣١٠	٦,٢٩١	١١,١٦٢	١٨,٠٢٠	٣٤,٥٥٢	٥٩,٧٦٦	٩٠,٥٨٠	١٨٦,٨٨٢	٣٢٣,٥٢٣
	١٠٠	٠,٦١١	١,١٢١	١,٨٨٤	٣,٢٠٩	٦,١٠٠	١٠,٨٢٣	١٧,٤٧٣	٣٣,٥٠٣	٥٧,٩٥١	٨٧,٨٣١	١٨١,٢٠٩	٣١٣,٧٠٢
	١١٠	٠,٥٩٥	١,٠٩٢	١,٨٣٤	٣,١٢٥	٥,٩٤١	١٠,٥٤٠	١٧,٠١٦	٣٢,٦٢٧	٥٦,٤٣٥	٨٥,٥٣٢	١٧٦,٤٦٧	٣٠٥,٤٩٣

* القيم في الجدول على أساس درجة حرارة التشبع في المبخر –٥°م، عند اختلافها عن هذه القيمة تضرب قيم الجدول في عامل التصحيح F الآتي:

المبرد	درجة حرارة التشبع للسحب (في المبخر) [°م]						
	–٥٠	–٤٠	–٣٠	–٢٠	٠,٠	٥	١٠
مبرد ٢٢	٠,٨٧	٠,٩٠	٠,٩٣	٠,٩٦	–	١,٠٢	–
مبرد ١٣٤أ	–	–	–	–	١,٠٤	١,٠٤	١,٠٦
مبرد ٥٠٢	٠,٧٧	٠,٨٣	٠,٨٨	٠,٩٣	–	١,٠٤	–

وهى أقل قيمة من ١°م وبالتالي يقبل التصميم. وبمراجعة جدول ٩,٦ تكون أدنى سعة تبريد بالخط تكفي لأن يحمل الغاز الساخن زيت التزييت معه إلى أعلى الخط الصاعد هي ١٨,٠٢ كيلووات، أي أقل من ٤٠ كيلووات، وبالتالي يصلح التصميم.

٩,٩ تصميم مسار خط البخار المتكثف

تستخدم بعض نظم التبريد مستقبلاً لتخزين سائل المبرد القادم من المكثف، وعمومًا لا ينصح باستخدام المستقبلات إلا إذا استلزم التصميم ذلك، فإذا استخدم نظام التبريد مستقبلا لزم توصيل هذا المستقبل إلى المكثف. ويصمم هذا الخط بحيث يسري البخار المتكثف إلى المستقبل بسهولة دون أي عوائق، كما يجب أن تسمح هذه التوصيلة بإعادة البخار الذي قد ينتج في المستقبل– نتيجة ارتفاع درجة الحرارة به نسبيًا عن درجة حرارة المكثف– إلى المكثف حيث يعاد تكثيفه مرة أخرى.

ويعتمد مسار وخط البخار المتكثف على نوع المستقبل المستخدم. وتنقسم المستقبلات عمومًا إلى نوعين أساسين. يعرف النوع الأول بالمستقبل خلالي النوع، حيث يسري البخار المتكثف القادم من المكثف خلال المستقبل ثم يسحب من المستقبل سائل المبرد حسب حاجة المبخر(انظر شكل ٩,١٧). ويعرف النوع الثاني بالمستقبل متمدد النوع، حيث يسري البخار المتكثف القادم من المكثف إلى

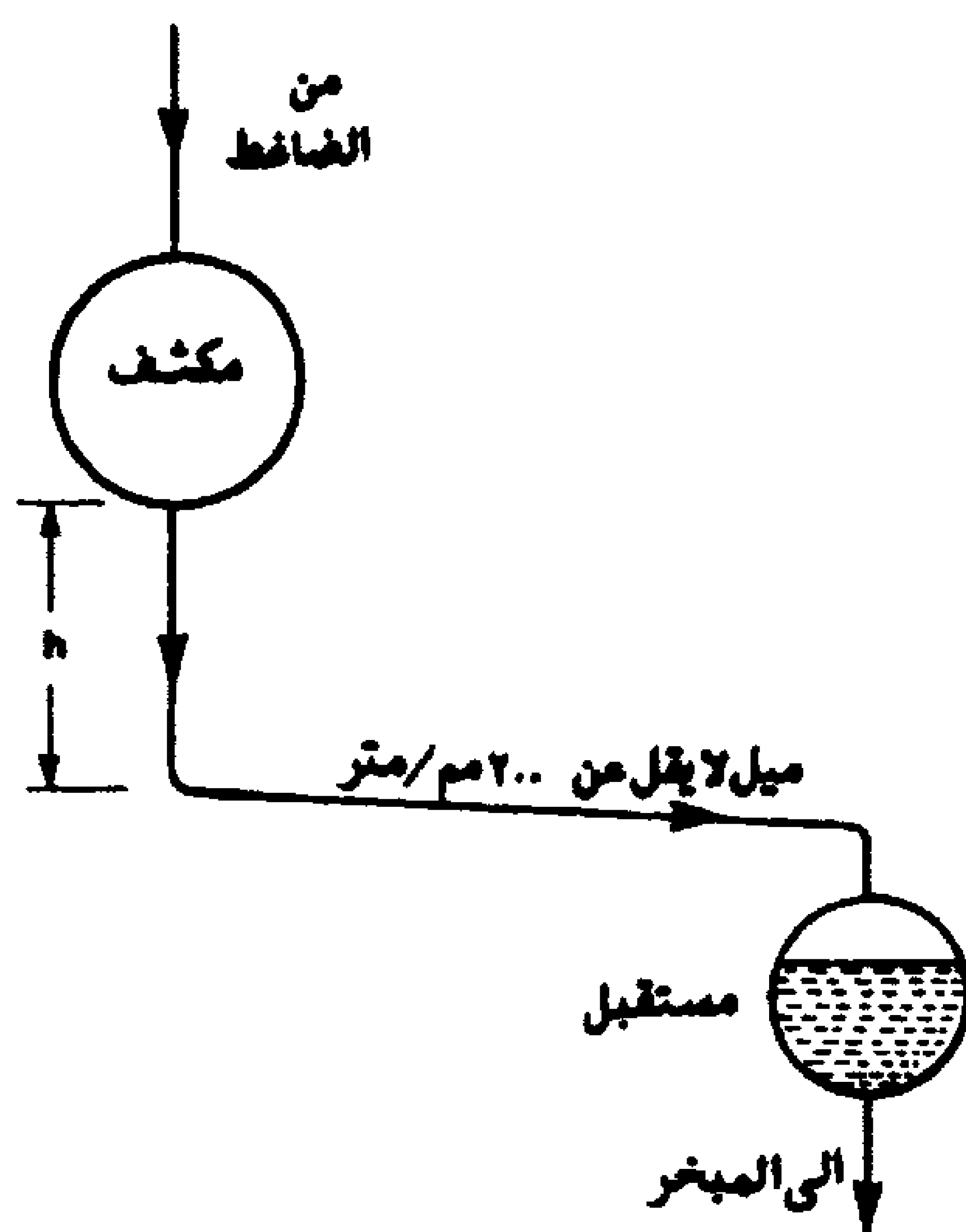
المبخر مباشرة مع توصيل هذا الخط بالمستقبل لسحب أي مقدار إضافي من سائل المبرد من المستقبل أو لتخزين الزائد منه حسب احتياج المبخر (انظر شكل ٩,١٨). وبالتالي يتمدد حجم السائل داخل المستقبل حسب ظروف التشغيل.

ويوضح شكل ٩,١٧ توصيل مستقبل خلالي النوع إلى المكثف. لاحظ ضرورة ألا تقل المسافة الرأسية للخط عن حد أدنى لضمان تغلب السريان على: فقد الضغط خلال الخط، وفرق الضغط بين المستقبل والمكثف، حيث يزيد ضغط الأول عن ضغط الثاني نتيجة انتقال الحرارة من الجو المحيط إلى المستقبل.

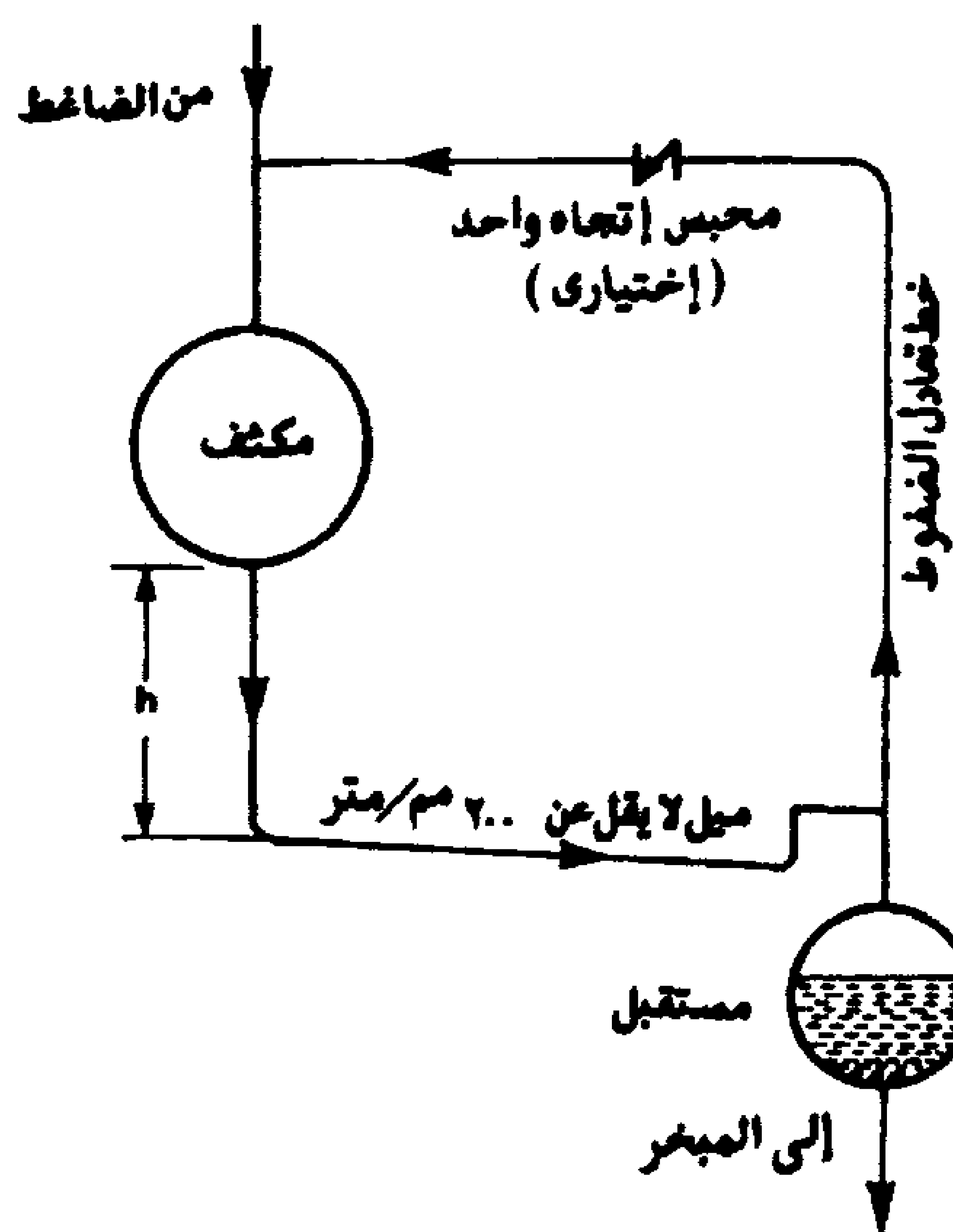
ويلزم أيضًا أن يميل هذا الخط إلى المستقبل بما لا يقل عن ٢٠٠مم/متر لتيسير سريان السائل إلى المستقبل، كما هو موضح بشكل ٩,١٧. ويجب أن يكون قطر هذا الخط كافيًا لسريان السائل من المكثف إلى المستقبل بالإضافة إلى سريان البخار الناتج في المستقبل، من المستقبل إلى المكثف، أي في الاتجاه العكسي، حيث يعاد تكثيفه في المكثف. ويتحقق هذا الشرط عادة إذا لم تزد سرعة البخار المكثف عن ٠,٥متر/ث. ويوضح جدول ٩,٧ الحد الأدنى لطول الخط النازل من المكثف إلى المستقبل. كما يوضح شكل ٩,١٧(ب) استخدام خط خارجي لمعادلة ضغط المستقبل مع ضغط المكثف. لاحظ عندئذ استخدام مصيدة السائل في نهاية خط البخار المتكثف القادم من المكثف لمنع البخار المتولد في المستقبل من الدخول إلى هذا الخط. أيضًا يمكن تركيب محبس أحادي الاتجاه (اختياريًا) على خط تعادل الضغطيين لمنع الغاز الساخن، القادم الضاغط، الدخول إلى خط التعادل.

جدول ٩,٧ أقل مسافة رأسية مسموح بها بين المستقبل والمكثف [Pita, 1984].

المقاس الاسمي للخط	مم	١٥-٢٥	٢٥-٤٠	٥٠-١٠٠
أقل طول مسموح به	مم	٢٠٠	٣٨٠	٤٦٠



(أ) توصيل المستقبل الى المكثف بدون خط تعادل

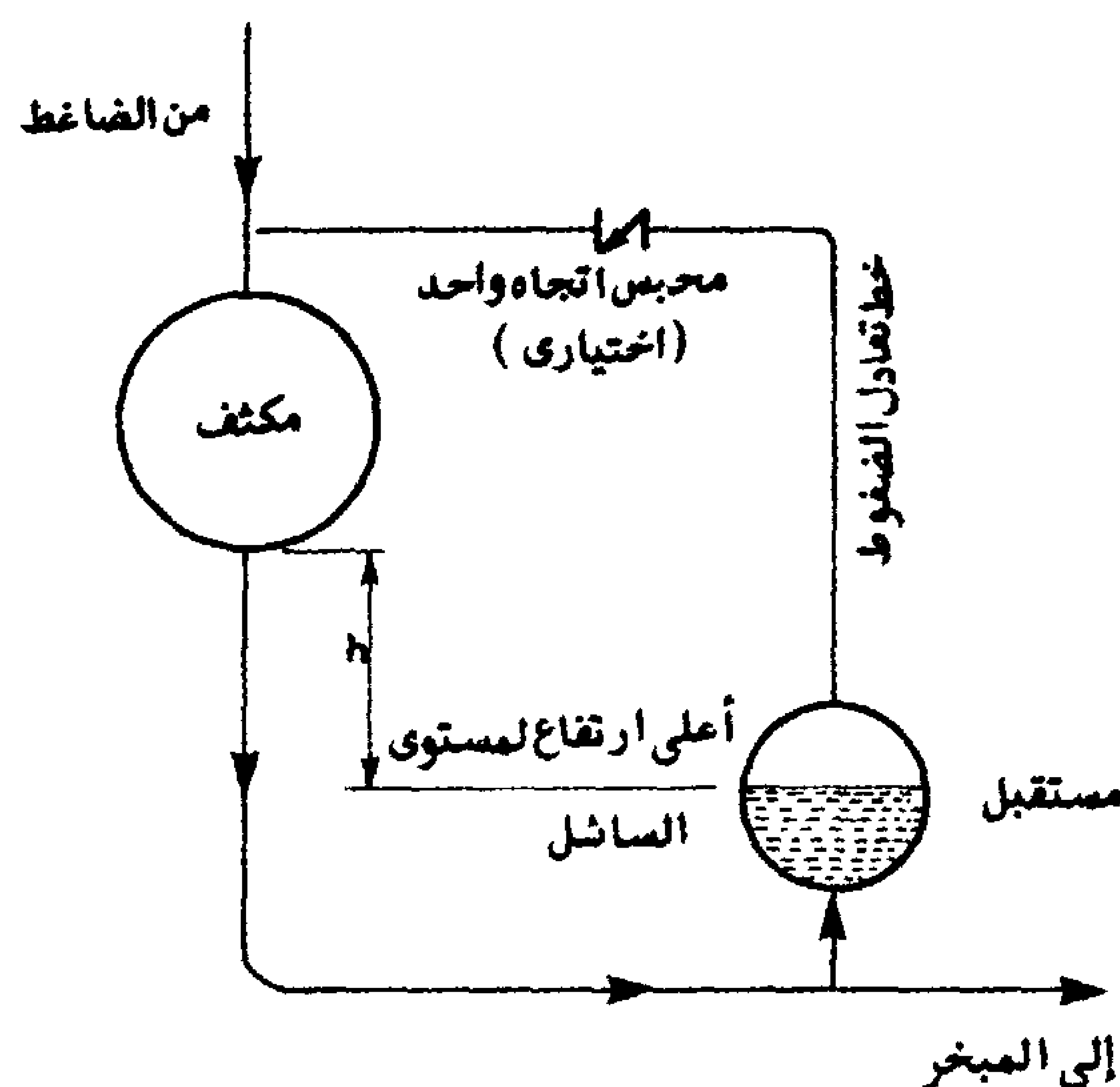


(ب) توصيل المستقبل الى المكثف بخط تعادل

شكل ٩,١٧ توصيل مستقبل خلالي النوع مع المكثف وبدون استخدام خط تعادل.

يوضح شكل ٩,١٨ توصيل مستقبل متمدد النوع إلى المكثف. في هذه الحالة يجب على المصمم مراعاة أن يكفي ارتفاع عمود السائل h التغلب على

فقد الضغط في الخط الواصل بين المكثف والمستقبل وفقد الضغط بالمكثف، بالإضافة إلى فقد الضغط في خط التهوية بين المستقبل والمكثف (خط تعادل الضغوط)، ويجب عادة ألا يقل طول المسافة h عن ٣٦٠مم.



شكل ٩,١٨ توصيل مستقبل متمدد النوع إلى المكثف.

تصمم خطوط البخار المتكثف عادة بحيث لا تزيد سرعة هذا البخار المتكثف داخلها عن ٠,٥م/ث، كما بينا سابقًا. وتوضح جداول ٩,٢ إلى ٩,٤ أقصى سعة تبريد ممكنة مع أقطار مختلفة لهذا الخط لمبرد ٢٢ وللأمونيا.

مثال ٩,٦

في مثال ٩,٤ أوجد قطر خط البخار المتكثف الذي يمكن استخدامه مع نظام التبريد، إذا كان النظام يستخدم مستقبلاً خلالي النوع.

الحل

من جدول ٩,٣ نجد أن أنابيب نحاس مقاس ٤٢ مم تعطي سعة تبريد ١٠٣,٤ كيلووات، حيث تساوي سرعة البخار المتكثف ٠,٥ متر/ث.

٩,١٠ الاهتزازات والضوضاء والعزل الحراري لخطوط المبرد

تنشأ الاهتزازات والضوضاء في خطوط المبرد المختلفة أساسًا من الضاغط، حيث إنه هو المصدر الوحيد للحركة الميكانيكية. لذا يجب عند توصيل خط السحب وخط الغاز الساخن إلى الضاغط مراعاة التقليل من الاهتزازات، وبالتالي الضوضاء المنقولة من الضاغط إلى خطوط الأنابيب، ويجب أن يعمل المصمم على التقليل من هذه الاهتزازات. وتنشأ الاهتزازات بالضاغط من أحد المصادر الثلاث الآتية: الحركة الميكانيكية للضاغط وما يصاحبها من اهتزازات، والسريان المتردد الناتج من الضواغط الترددية، والسريان المضطرب عند الخروج من الضاغط. ويتم عمومًا خفض هذه الاهتزازات بعدة طرق أهمها الآتي :

أ) خفض سرعة دوران الضاغط إلى الحد الأدنى المتاح بالصناعة.

ب) خفض سرعة خروج الغاز الساخن والبخار المسحوب من وإلى الضاغط باختيار خطوط كبيرة نسبيًا، وإن كان هذا على حساب زيادة التكلفة الأولية.

ج) تركيب وصلات مرنة بين خطوط السحب والطرد (الغاز الساخن) والضاغط لتخفيف الاهتزازات المنقولة من الضاغط، وفي كثير من الأحيان، خاصة في النظم الصغيرة التي قد تستخدم أنابيب نحاس طري تشكل هذه الأنابيب على هيئة ملف بالقرب من الضاغط لتخفيف نقل الاهتزازات.

د) تقليل الاهتزازات والضوضاء بخطوط المبرد بمراعاة عدم تثبيت خطوط السحب والغاز الساخن على مسافات أقل من ١٥ قطر الخط

من موضع التوصيل بالضاغط، وقد تستخدم أيضًا وصلات مرنة بين خطوط السحب والغاز الساخن مع الضاغط لتخفيف هذه الاهتزازات والضوضاء.

هـ) استخدام كاتم صوت على خط الغاز الساخن عند الخروج من الضاغط.

يتم عادة عزل خطوط السحب حراريًا عن الجو المحيط بعازل حراري به حاجز بخار، وذلك لحماية هذه الخطوط من العرق وتقليل مقدار الحرارة المكتسبة من الجو المحيط. أما خطوط السائل فلا تعزل حراريًا إلا في الأحوال التي تقل درجة حرارة السائل بها عن الجو المحيط. وفي بعض الأحيان يفضل أن تمر خطوط السائل وخطوط السحب جنبًا إلى جنب، حيث يعزلا معًا بعازل حراري بغرض أن يعمل الخطان كمبادل حراري لتبريد خط السائل. وتترك خطوط الغاز الساخن في معظم الأحوال بدون عزل حراري للمساعدة على تبريد الغاز الساخن بالجو المحيط، إلا أنه في بعض الأحيان قد تمثل الحرارة المفقودة من هذه الخطوط حملا حراريًا غير مرغوب فيه في الأماكن التي تمر بها، أو قد تمثل خطرًا حراريًا إذا لمسها بعض الأشخاص بطريقة عفوية، عندئذ ينصح بعزلها.

الرموز ومعانيها للفصل التاسع

L طول الأنبوب أو الماسورة [م]

L'' الطول المكافئ للفقد في الضغط الثانوي [م]

L_e الطول المكافئ للفقد في الضغط الكلي [م]

e خشونة السطح [م]

F معامل التصحيح [-]

V السرعة [م/ث]

$\dot{Z}$ سعة التبريد من الفعلية [كيلو وات]

$\dot{Z}_t$ سعة التبريد من الجدول [كيلو وات]

الحروف الإغريقية

ε الخشونة النسبية [-]

ΔP الفقد في الضغط الكلي [باسكال]

$\Delta P'$ الفقد في الضغط الرئيسي [باسكال]

$\Delta P''$ الفقد في الضغط الثانوي [باسكال]

ΔP_f الفقد في الضغط نتيجة الاحتكاك [باسكال]

ΔP_h الفقد أو الكسب في الضغط نتيجة الصعود أو النزول [باسكال]

ΔT التغير في درجة حرارة التشبع المكافئ الفعلي [°م]

ΔT_t التغير في درجة حرارة التشبع المكافئ من الجدول [°م]

الفصل العاشر
نظم التحكم الآلي

١٠,١ مقدمة

التحكم الآلي ضرورة لا غنى عنه في التطبيقات الهندسية والصناعية، وذلك لضمان عمل الأجهزة والمعدات بشكل آمن، وتغير سعاتها حسب الحاجة، إضافة لتوفير وترشيد استخدام الطاقة. يعمل على سبيل المثال مفتاح الضغط المنخفض في دائرة التبريد على إيقاف (أو فصل التيار عن) الضاغط عند وصول ضغط السحب إلى قيمة صغيرة حفاظًا على سلامة الضاغط. هذه القيمة يتم برمجة الحاكم عليها، وكذلك الحال بالنسبة لضغط الطرد. كما يقوم نظام التحكم في غرفة تخزين المواد الغذائية بإيقاف وتشغيل نظام التبريد حسب الحاجة الفعلية عن طريق قياس درجة الحرارة في غرفة التخزين.

يتناول هذا الفصل المكونات الأساسية لمنظومة التحكم الآلي بصورة عامة ويستعرض أنواع التحكم المختلفة، ثم يتم تقديم أنظمة التحكم وأمثلة عليها في دائرة التبريد، ثم عرض لأجهزة القياس والاستشعار الأكثر استخداما في مخازن التبريد، ثم عرض لأنواع أداة التحكم المستخدمة، وأخيرًا يتم تقديم نبذة مختصرة عن التحكم الرقمي.

١٠,٢ المكونات الأساسية لمنظومة التحكم الآلي

للتحكم في متغير معين (درجة الحرارة على سبيل المثال في غرفة التبريد) لا بد من جهاز لقياس هذا المتغير ثم مقارنته بالقيمة المراد الوصول لها (نقطة الضبط). أيضا يلزم وجود متحكم لإعطاء إشارة لأداة التحكم لعمل اللازم نحو تقليل الفرق بين هاتين القيمتين (المتغير ونقطة الضبط). هذا هو بإيجاز ما

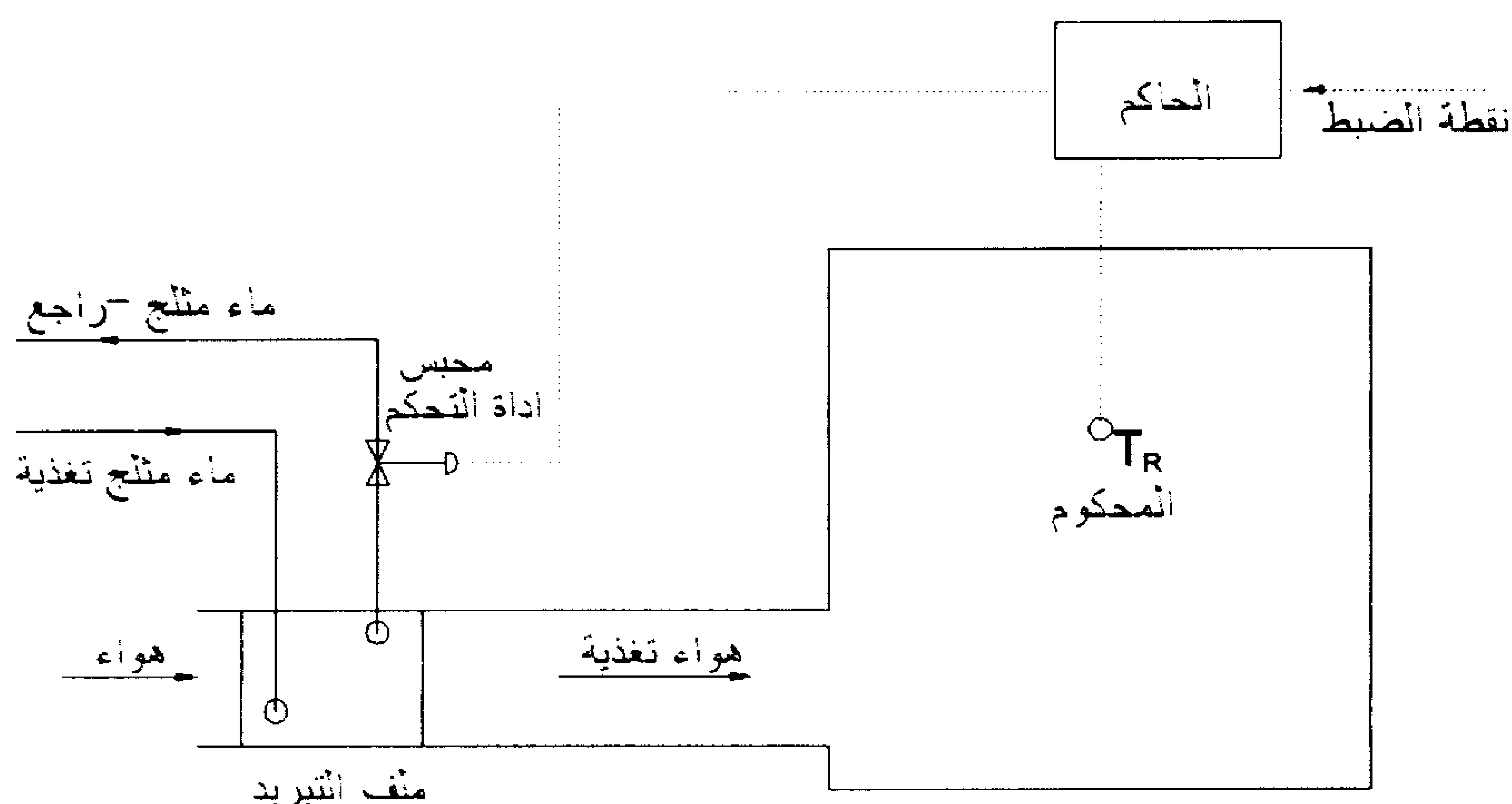
يتم عمله في دائرة التحكم المغلقة (closed control loop)، ويوضح الشكل ١٠,١ المكونات الرئيسية لهذه الدائرة، وهي:

- جهاز قياس يعرف بالمجس أو الحاس (sensor)
- المتحكم أو الحاكم (controller)
- أداة التحكم (controlled device)

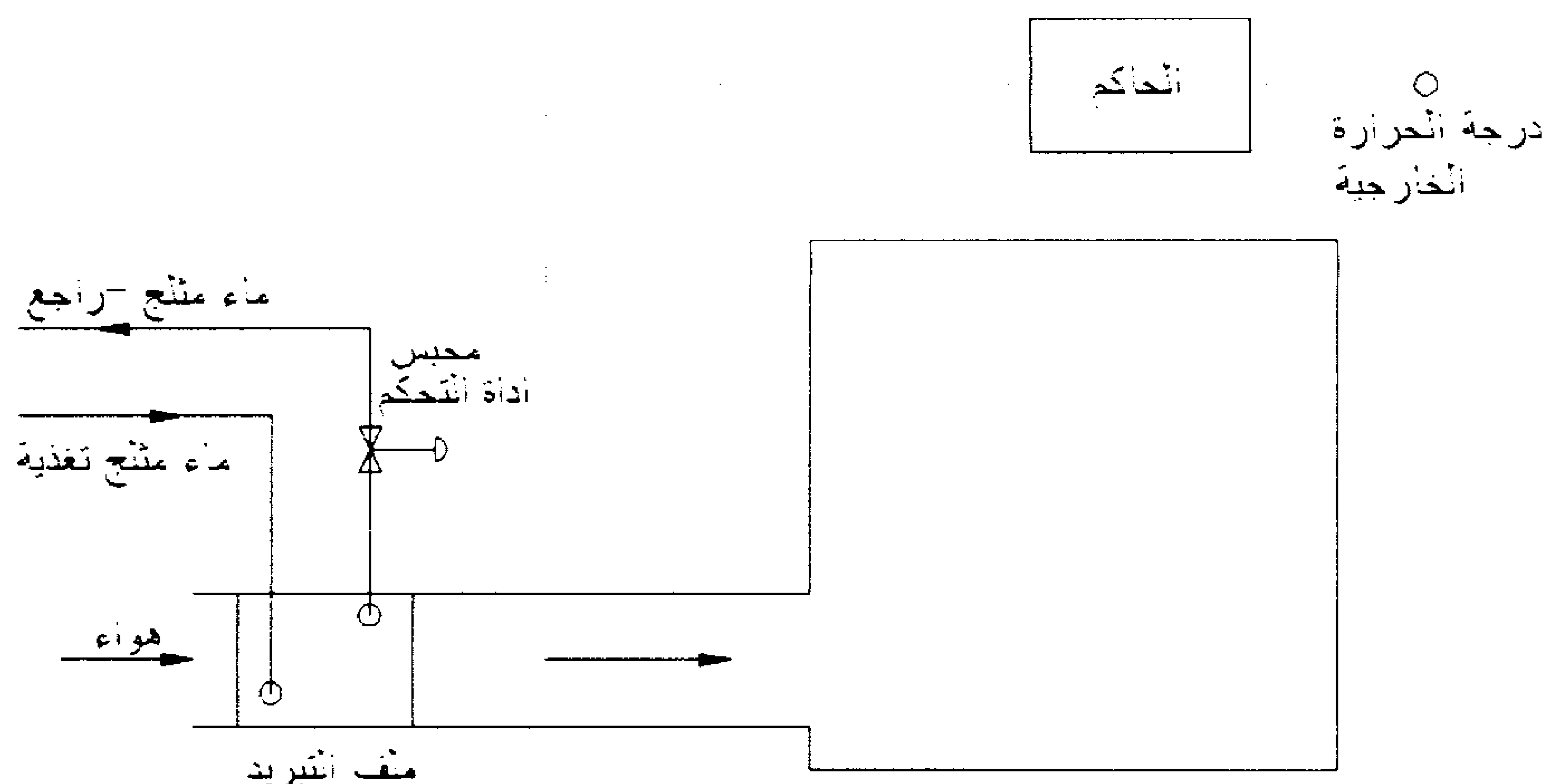
ففي المثال السابق يقوم المجس بقياس درجة الحرارة ويرسلها إلى الحاكم، في نفس الوقت يستقبل المتحكم إشارة نقطة الضبط (وهي درجة الحرارة المطلوب المحافظة عليها داخل الغرفة). عند وجود فرق (أو حيود) بين درجتي الحرارة التي يستقبلها الحاكم، يقوم بدوره بإرسال إشارة لأداة التحكم (مثل: محبس، أو مضخة، أو مروحة، أو خانقة هواء) لأخذ الإجراء اللازم. في المثال الموضح في شكل ١٠,١ يمكن أن تكون إشارة التحكم إما بفتح المحبس أو بإغلاقه.

لاحظ أن المتغير المراد التحكم فيه (المحكوم) هو درجة حرارة الغرفة وأن أداة التحكم هي المحبس (الصمام)، كما أن عنصر أو وسيط التحكم (control agent) هو الماء المثلج الواصل لملف التبريد، وأن العملية (process) هي تبريد الغرفة باستخدام ملف التبريد.

يمكن تقسيم أنواع التحكم إلى تحكم في دائرة مغلقة (closed control loop) مثل المثال الموضح بالشكل ١٠,١، أو تحكم في دائرة مفتوحة (open control loop). في الدائرة المفتوحة لا توجد علاقة أو إشارة بين المحكوم والحاكم، ويمكن اعتبار التحكم في درجة حرارة الغرفة بناء على قياس درجة الحرارة الخارجية للجو كمثال على دائرة التحكم المفتوحة. فالحاكم ليس له علم بدرجة حرارة الغرفة. ويبين الشكل ١٠,٢ دائرة تحكم مفتوحة.



شكل ١٠,١ المكونات الرئيسية لمنظومة تحكم آلي (دائرة تحكم مغلقة).



شكل ١٠,٢ دائرة تحكم مفتوحة.

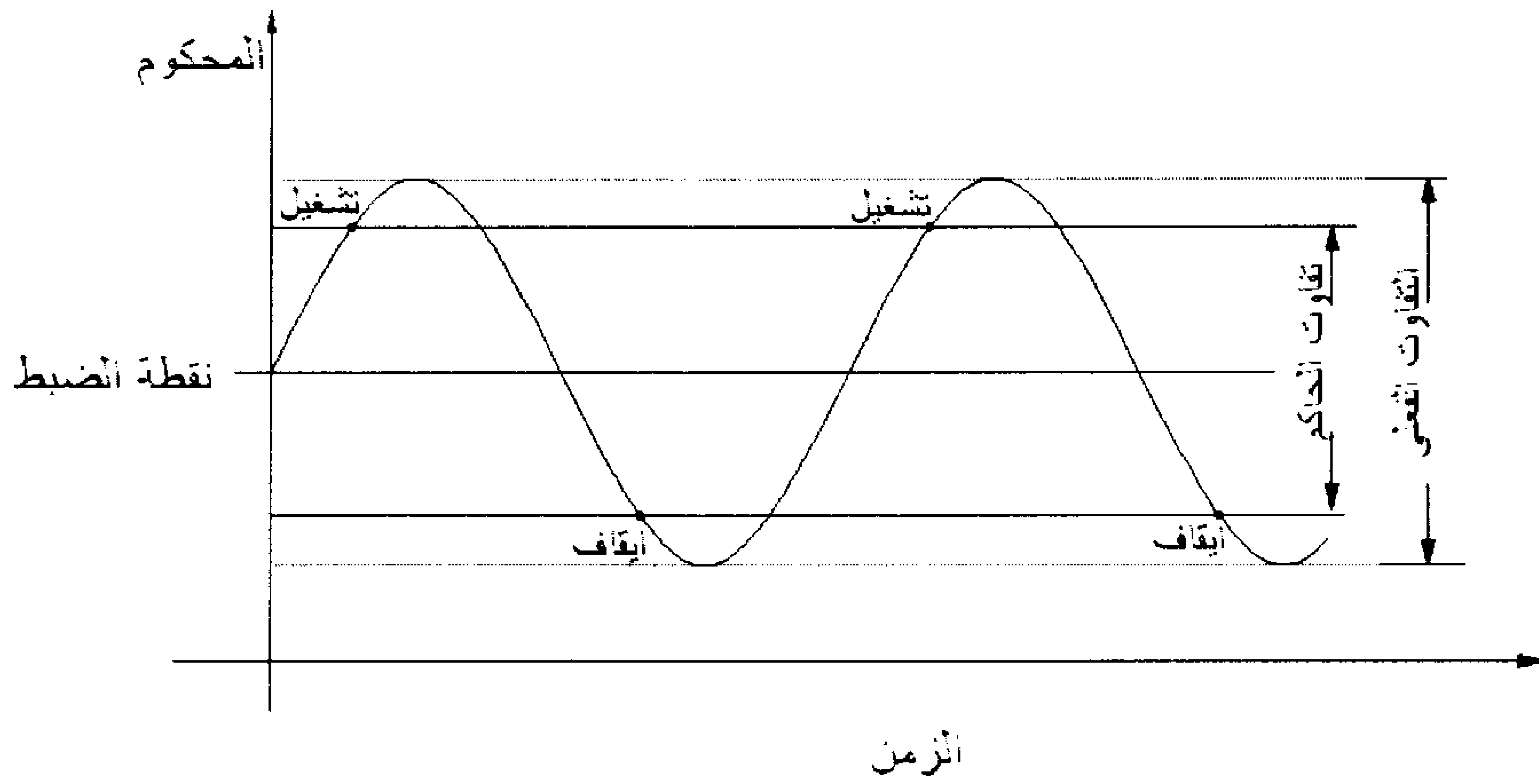
١٠,٣ نظام تحكم بسيط من نوع تشغيل/إيقاف

يعمل هذا النظام في وضع التشغيل أو في وضع الإيقاف، وأمثلة هذا النظام كثيرة، مثل التحكم في تشغيل وإيقاف الثلاجة المنزلية أو وحدة التكييف من نوع الشباك أو المنفصل. بالرجوع إلى شكل ١٠,١ يعطي الحاكم إشارة للمجس بقفل أو بفتح صمام الماء المثلج تبعا للفرق بين درجتي حرارة الغرفة

ونقطة الضبط. فمثلا بفرض أن نقطة ضبط غرفة التبريد ٥ درجات مئوية، وبفرض مدى تفاوت الثيرموستات حول نقطة الضبط، قدره درجتين، درجة أعلى من نقطة الضبط ودرجة أقل من نقطة الضبط. أي إن درجة الحرارة داخل الغرفة تتفاوت بين ٤ و ٦ درجات مئوية. بالنظر إلى التغير الفعلي لدرجة الحرارة داخل الغرفة مع الزمن سنجده يتغير بتفاوت أكثر من درجتين. ويوضح الشكل ١٠,٣ أنه عندما تصل درجة الحرارة إلى ٦ درجات يقوم الحاكم بإرسال إشارة إلى أداة التحكم بفتح الصمام لكن بسبب التأخر الزمني ستزيد درجة الحرارة عن ٦ درجات، أي إن درجة حرارة الغرفة لن تهبط حال فتح الصمام مباشرة، وذلك بسبب الحرارة المخزنة في الغرفة والملف. وتسمى قيمة الزيادة فوق الـــ ٦ درجات بالشطح العلوي (overshoot)، ونفرض أن هذا الشطح يساوي نصف درجة. أيضا عندما تقل درجة حرارة الغرفة إلى ٤ درجة فإن الحاكم يرسل إشارة لأداة التحكم بقفل الصمام وإيقاف الماء المثلج عن ملف التبريد، ونظرًا للتأخر الزمني فسوف تقل درجة الحرارة داخل الغرفة إلى أقل من ٤ درجات، ويسمى الفرق بين أدنى قيمة تصل لها درجة الحرارة داخل الغرفة والأربع درجات بالشطح السفلي (undershoot)، وبفرض أن قيمة هذا الشطح أيضا بنصف درجة، لذلك يصبح التفاوت الفعلي لهذا الحاكم ٣ درجات. أي إن درجة حرارة الغرفة ستكون محصورة بين ٣,٥ و ٦,٥ درجة، بالرغم أن تصميم الحاكم كان بتفاوت للحاكم يبن ٤ و٦ درجات [McQuistion *et al.* 2005].

١٠,٤ أنواع التحكم

يمكن تقسيم أنظمة التحكم إلى أنواع مختلفة حسب نوع التقسيم، فمثلا من ناحية نوعية الطاقة المستخدمة بين الحاكم وأداة التحكم يمكن تقسيم أنظمة التحكم إلى:



شكل ١٠,٣ تغير درجة الحرارة داخل الغرفة مع الزمن لنظام تحكم من نوع تشغيل/إيقاف.

أ) هوائية (pneumatic)

ب) كهربائية (electric)

ج) إلكترونية (electronics)

كما يمكن تقسيم أنظمة التحكم من حيث نوع إجراء التحكم إلى:

أ) نظام تشغيل/ إيقاف (ON-OFF)

ب) نظام تشغيل/إيقاف موقوت (timed ON-OFF)

ج) نظام التحكم العائم (floating control)

د) نظام التحكم المتغير (modulating control)

تحدثنا في الجزء السابق من هذا الفصل عن نظام التحكم من نوع تشغيل/إيقاف، وفيما يلي سيتم استعراض لبقية أنواع أنظمة التحكم الأخرى.

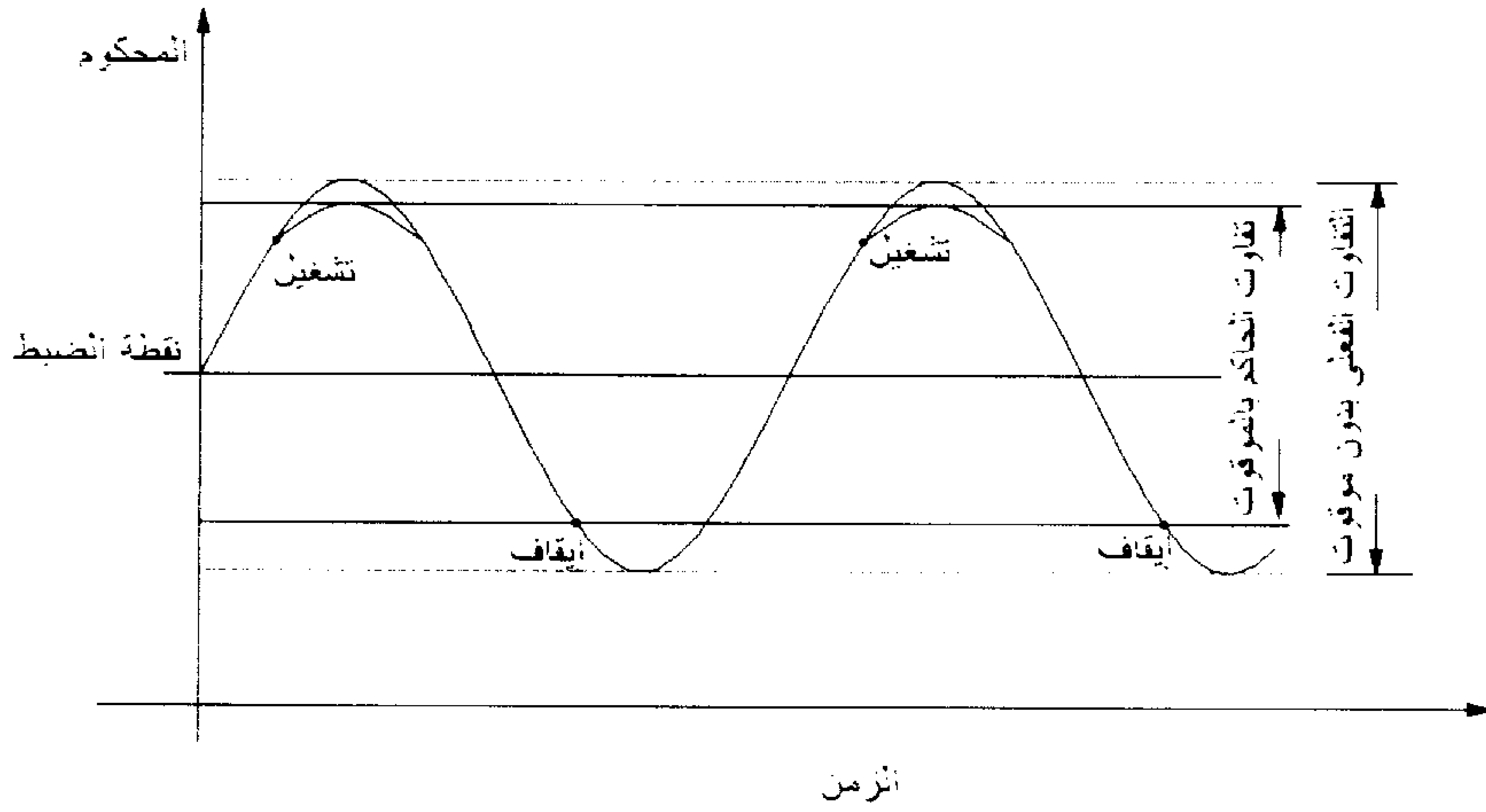
١٠,٤,١ نظام تحكم من نوع تشغيل/إيقاف موقوت

يشبه هذا النظام نظام التحكم من نوع تشغيل/إيقاف ماعدا أنه يتم وضع سخان صغير قريب من المجس، ويعمل هذا السخان خلال فترة الإيقاف. يقوم هذا السخان بتضليل (إن صح التعبير) المجس لقياس درجة الحرارة وإعطاء إشارة للحاكم ومن ثم لأداة التحكم بتشغيل (أو فتح الصمام). عندما يُعطي المجس أن درجة الحرارة أعلى من درجة الحرارة الفعلية، فإن الحاكم سيأمر بفتح الصمام قبل أن تصل درجة حرارة الغرفة لدرجة الحرارة التي كان من المفترض أن يصلها بدون السخان الصغير. وعند ذلك فإن الشطح العلوي يكون أقل في هذه الحالة إذا ما قورن بنظام تشغيل/إيقاف. ولذلك فإن هذا النوع من التحكم يقلل من التفاوت الفعلي ويجعله أقرب إلى تفاوت الحاكم. ويمكن التعميم بصورة أشمل أن كل أنواع التحكم الأخرى ما هي إلا طرق مختلفة لتقريب التفاوت الفعلي ليكون مماثلا أو قريبا من تفاوت الحاكم مع سرعة في الاستجابة واستقرار في الأداء. ويبين الشكل ١٠,٤ تغير المحكوم (درجة الحرارة) مع الزمن لنظام تحكم تشغيل/إيقاف موقوت. في أنظمة التسخين (بدلا من التبريد) يعمل السخان الصغير بجانب المجس خلال فترات عملية تشغيل التسخين [ASHRAE 2005, Schneider 1981].

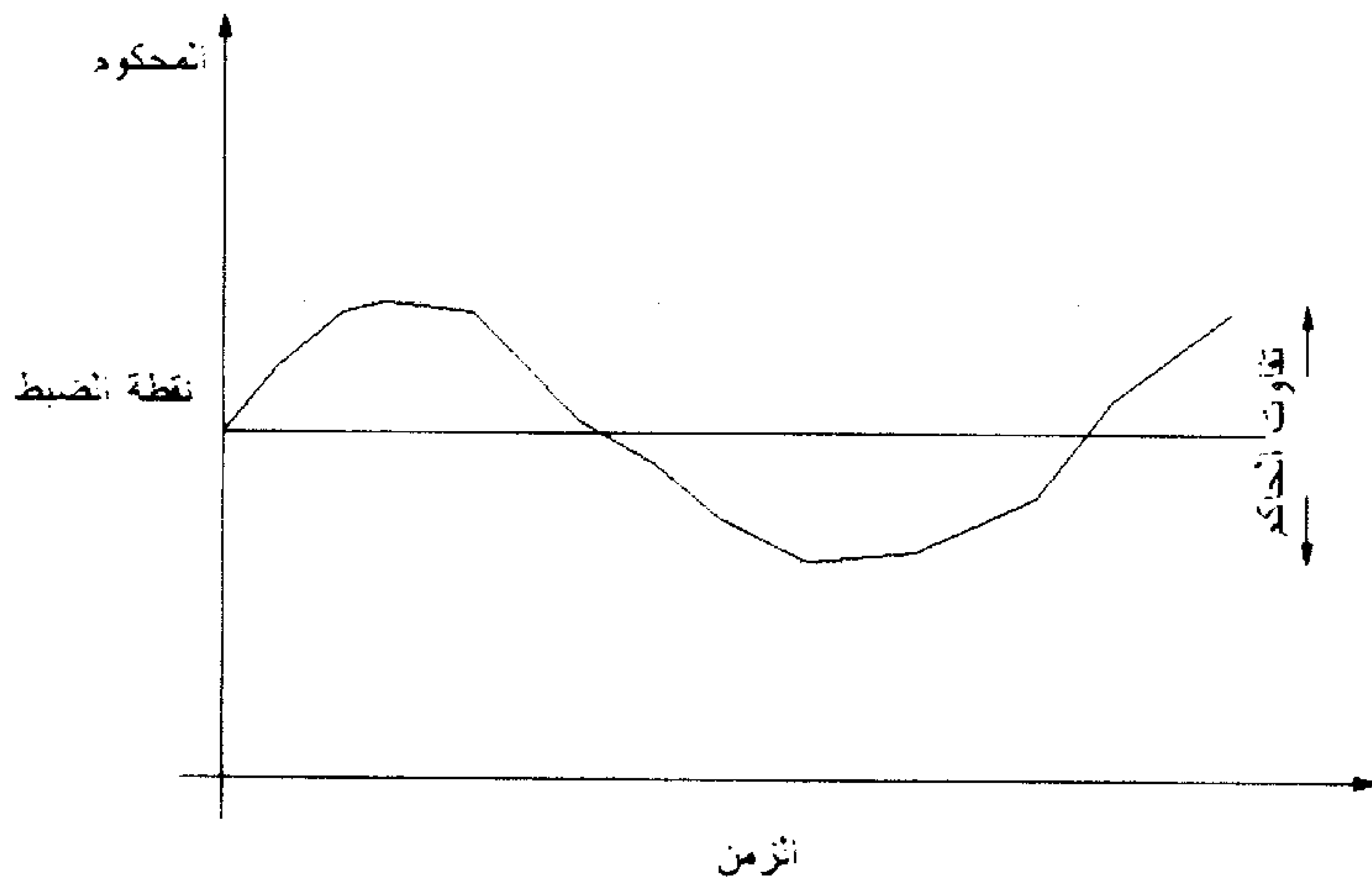
١٠,٤,٢ التحكم العائم

تتمحور آلية التحكم في هذا النوع من أداة التحكم حول أن إجراء التحكم له ثلاث حالات، هي: الاتجاه نحو الإغلاق، أو الاتجاه نحو الفتح، أو ترك الحال على ما هو عليه، ويكون الاتجاه نحو الفتح أو الإغلاق بمعدل ثابت [ASHRAE 2001]. يوضح الشكل ١٠,٥ تغير درجات الحرارة مع الزمن لنظام تحكم شبيه بنظام التحكم في غرفة تبريد، ما عدا أن أداة التحكم تعمل على التحكم في صمام الماء المثلج بأسلوب التحكم العائم. عندما تكون درجة حرارة الغرفة واقعة في

مدى التفاوت للحاكم، فإن الحاكم ومن ثم أداة التحكم لا تعطي إشارة لعمل أي شيء. أما إذا وصلت درجة حرارة الغرفة للحد الأعلى من التفاوت فإن الحاكم يأمر الصمام بالاتجاه نحو الفتح، فإذا لم تنخفض درجة الحرارة فيعيد الحاكم أمر الصمام نحو الفتح. وكذلك الحال عندما تقل درجة الحرارة عن الحد الأدنى من تفاوت الحاكم، فعندئذ يعطي الحاكم إشارة نحو القفل، وهكذا [Schneider 1981].



شكل ١٠,٤ تغير درجة الحرارة في نظام تحكم من نوع تشغيل/إيقاف موقوت (تطبيق تبريد).



شكل ١٠,٥ تغير درجة الحرارة في نظام تحكم عائم.

١٠,٤,٣ نظام التحكم المتغير

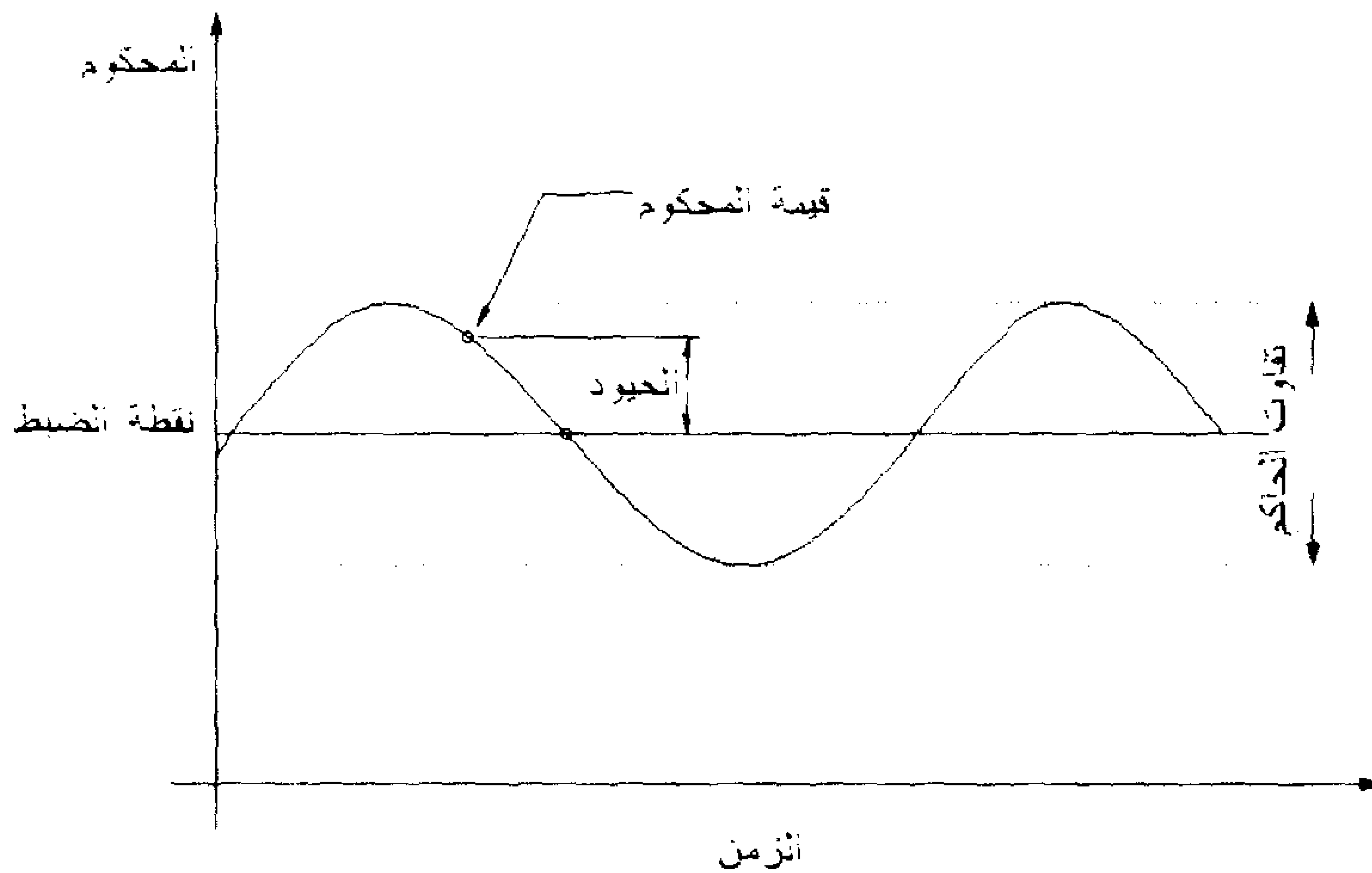
تتغير هنا الإشارة الموجهة لأداة التحكم حسب قيمة الخطأ (الحيود) أو الفرق بين درجة حرارة الغرفة الفعلية ودرجة حرارة الضبط. هناك أنواع من نظم التحكم المتغير، وقبل الدخول في أنواعها ينبغي معرفة بعض التعريفات كما يظهرها الشكل ١٠,٦، وهي:

أ) نقطة الضبط (set point)، وهي القيمة التي يُراد من الحاكم أن يحافظ عليها للمحكوم (المتغير الذي يراد التحكم فيه).

ب) قيمة المحكوم (control point)، وهي قيمة المحكوم الفعلية عند أي وقت.

ج) الحيود أو الخطأ (offset, shift or error)، هو الفرق بين قيمة المحكوم ونقطة الضبط.

د) مدى التحكم (throttling rang)، وهو مقدار التغير في المحكوم الذي يؤدي إلى تغير في إجراء التحكم من الحد الأدنى (الإغلاق مثلا) إلى الحد الأعلى (الفتح تمامًا).



شكل ١٠,٦ تعريفات لبعض المتغيرات لنظام تحكم متغير.

توجد ثلاثة أنواع مشهورة للتحكم المتغير تبعا لتأثير أداة التحكم، وهي:

أ) تحكم تناسبي (proportional controller).

ب) تحكم تناسبي- تكاملي (proportional -integral controller).

ج) تحكم تناسبي- تكاملي- تفاضلي (proportional-integral- derivative controller).

وفيما يلي عرض لهذه الأنواع الثلاثة.

تحكم تناسبي

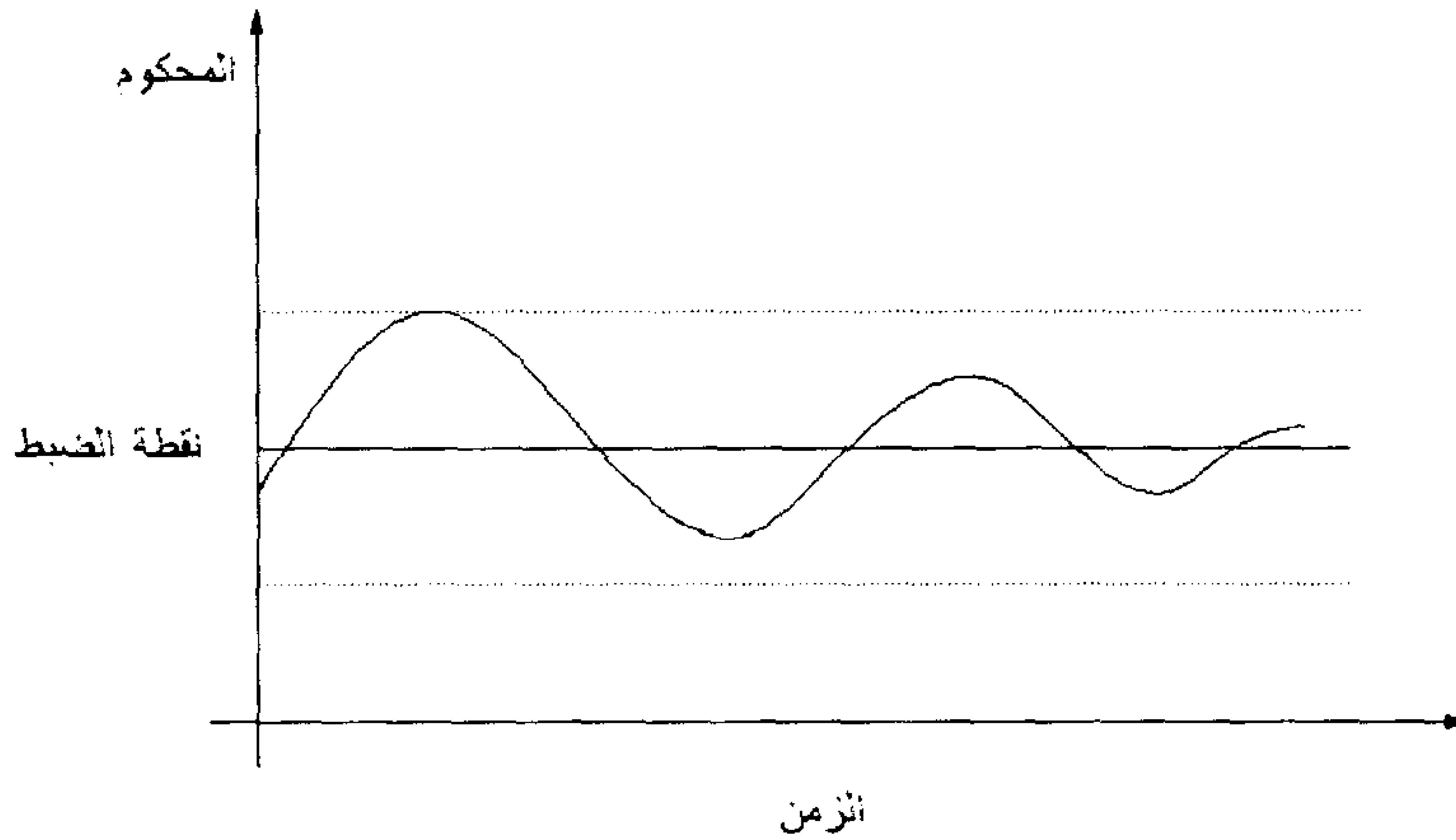
يكون إجراء أداة التحكم في هذا النوع متناسبا مع الحيود أو الخطأ، أي يمكن تمثيل ناتج (output) أداة التحكم بالمعادلة الآتية:

$$O = A + eK_p \qquad (10.1)$$

حيث "O" هو التأثير الناتج من أداة التحكم (أو موجه التحكم)، و"A" هو إجراء أداة التحكم عندما يكون الحيود مساويًا للصفر، و "e" هو الحيود أو الخطأ، و "K_p" هو ثابت التناسب.

كلما زادت قيمة K_p كلما كان نظام التحكم أسرع في الاستجابة، حتى وإن كان الحيود صغيرًا فإن تأثير أداة التحكم يكون كبيرًا، ولكن هذا قد يؤدي إلى عدم استقرار النظام (unstable system).

يبين الشكل ١٠,٧ نظام تحكم من نوع متغير التأثير (تحكم تناسبي) في حالة الاستقرار، حيث إن إجراء التحكم أوصلت النظام إلى فرق بسيط في الحيود. لاحظ أن نظام التحكم التناسبي لا يصل بالحيود إلى الصفر.



شكل ١٠,٧ تغير المحكوم لنظام تحكم تناسبي.

تحكم تناسبي- تكاملي (P+I)

لا يتناسب إجراء التحكم هنا فقط مع الحيود ولكن يتناسب أيضا مع تكامل الحيود مع الزمن. وتعطي المعادلة الآتية صيغة الناتج:

$$O = A + eK_p + K_I \int edt \qquad (10.2)$$

ويرمز لهذا النوع من التحكم بـ PI اختصار للتناسب والتكامل، وكما هو واضح بالمعادلة فإن إجراء التحكم يتكون من ثلاثة أجزاء، هي: حد ثابت، وحد يتناسب مع الحيود e، وحد يتناسب مع تكامل الحيود بالنسبة الزمن.

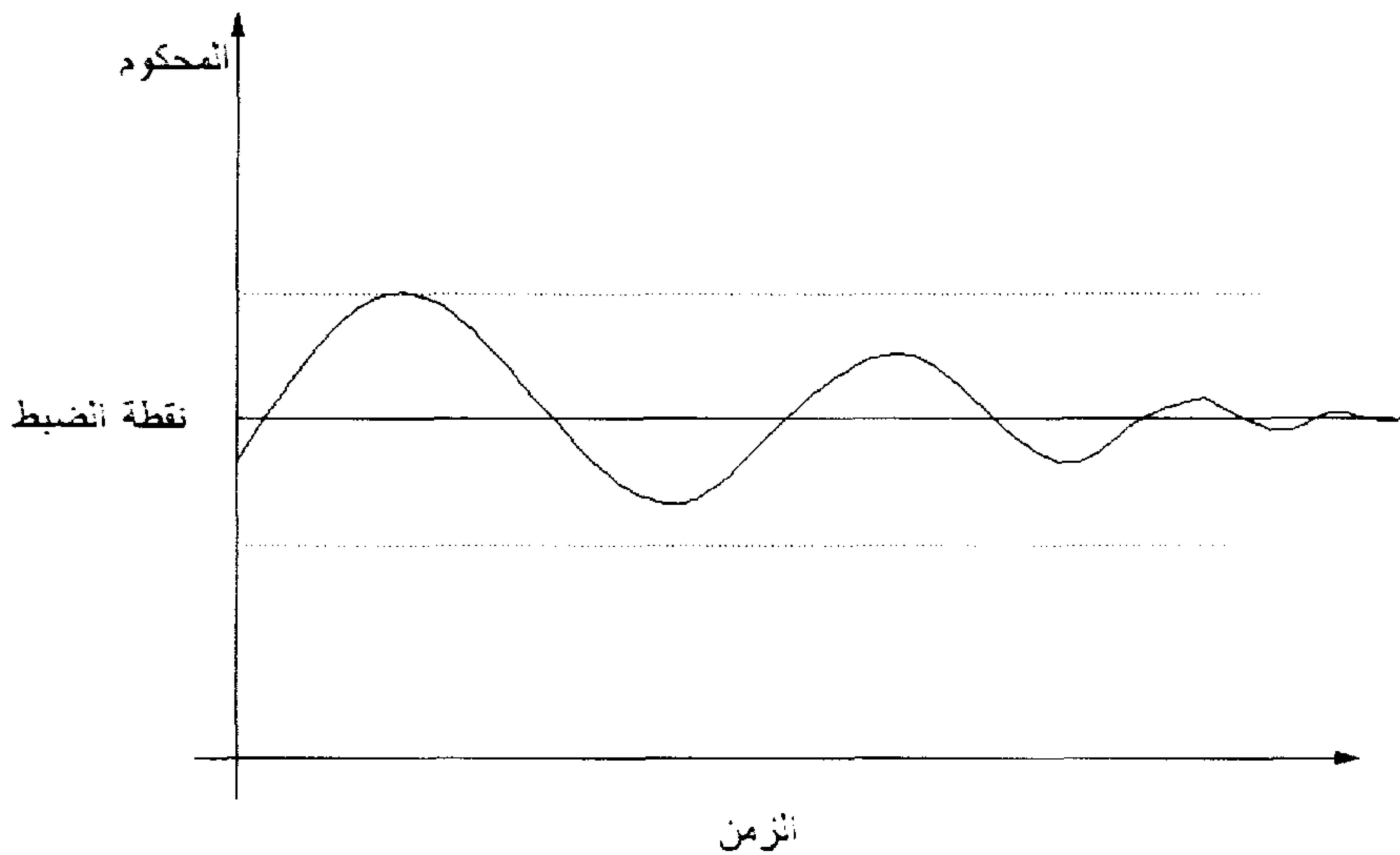
ويضمن هذا النوع من نظم التحكم أن يصل الحيود تقريبا إلى الصفر. ويستخدم هذا النوع من نظم التحكم في كثير من التطبيقات الهندسية، ومنها على سبيل المثال التحكم في درجات حرارة نظم تكييف الهواء.

تحكم تناسبي- تكاملي- تفاضلي (P+I+D)

يكون التأثير الناتج هنا من أداة التحكم متناسبا مع الحيود، وتكامل الحيود بالنسبة للزمن، وتفاضل الحيود بالنسبة للزمن ممثلا بالمعادلة الآتية:

$$O = A + eK_P + K_I \int edt + K_D \frac{de}{dt} \quad (10.3)$$

حيث تم تعريف الثلاثة حدود الأولى في الطرف الأيمن من المعادلة السابقة. ويعبر الحد الرابع عن الجزء الناتج من أداة التحكم الذي يتناسب مع تفاضل الحيود مع الزمن، بينما يكون K_D ثابتًا [ASHRAE 2005].



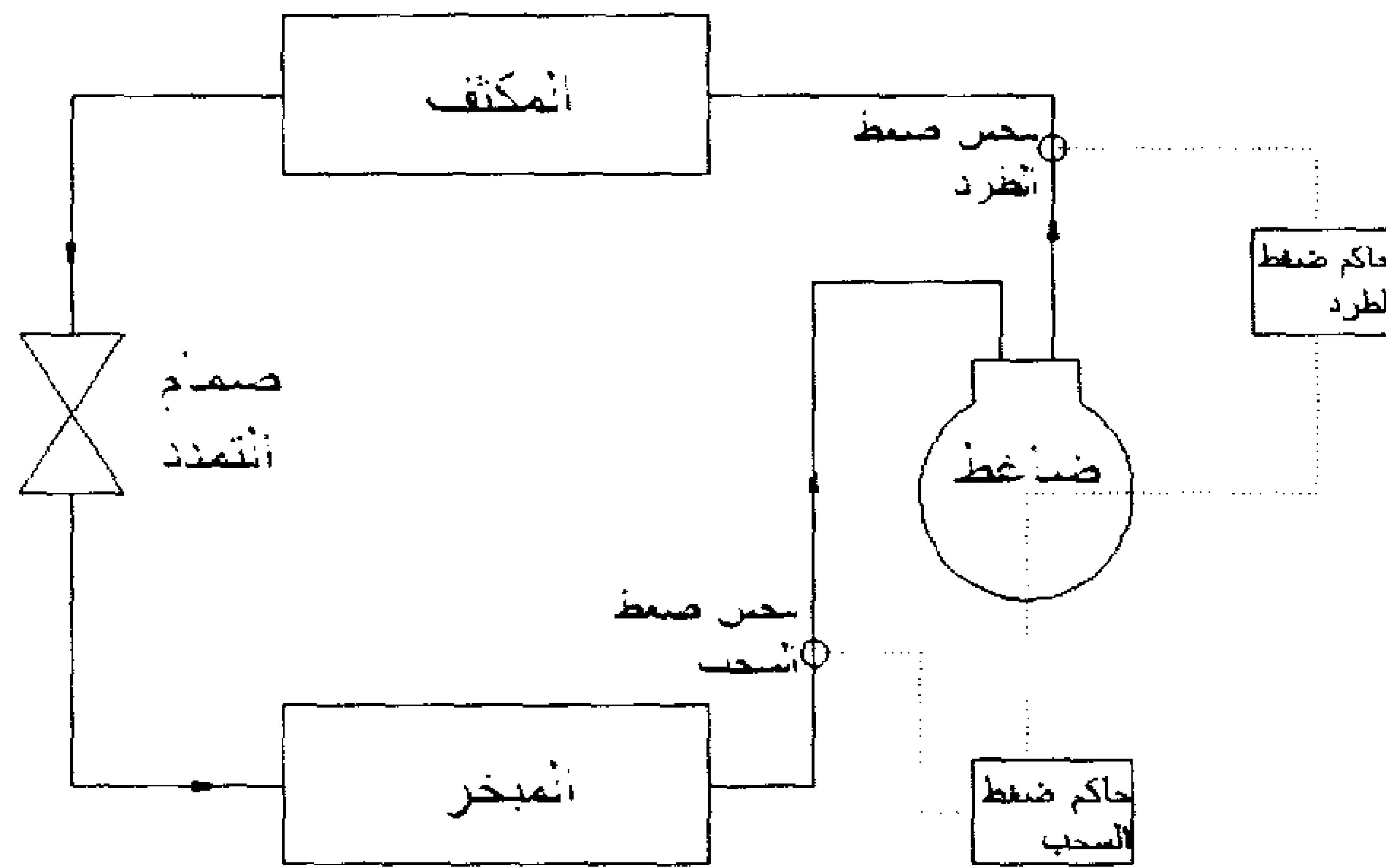
شكل ١٠,٨ تغير المحكوم لنظام تحكم تناسبي-تكاملي.

١٠,٥ أمثلة على تطبيقات التحكم الآلي في دورة التبريد بانضغاط البخار

في هذا الجزء سنستعرض بعضًا من تطبيقات التحكم في دورات التبريد بانضغاط البخار. ويعتبر الضاغط في دورة التبريد هو القلب النابض المحرك للدورة، فإذا ما تم إيقافه فإن الدورة تقف. لذلك يلزم وجود بعض أجهزة التحكم لسلامة عمل الضاغط وتوفير الطاقة اللازمة للتشغيل والتقليل من التدخل البشري.

فاصل الضغط المنخفض (السحب) والضغط العالي (الطرد)

يوجد في كثير من دوائر التبريد مفتاح تحكم أمني عند خط السحب (low pressure cutout) لإيقاف عمل الضاغط عندما يصل ضغط السحب إلى قيمة دنيا يتم برمجة الحاكم عليها. وكذلك الحال بالنسبة لضغط الطرد (high pressure cutout). يبين الشكل ١٠,٩ دائرة تبريد انضغاط البخار بها فاصل تيارللعمل حاكم أمان لضغط السحب، وفاصل تيار ضغط الطرد. يدمج الحاكمان (لضغط السحب وضغط الطرد) في بعض التطبيقات في حاكم واحد، وفي كل الأحوال يتم ضبط الضغطيين ومدى التفاوت حسب الحاجة [Dossat 1991].



شكل ١٠,٩ دائرة تبريد بها حاكم أمان لضغط السحب وضغط الطرد.

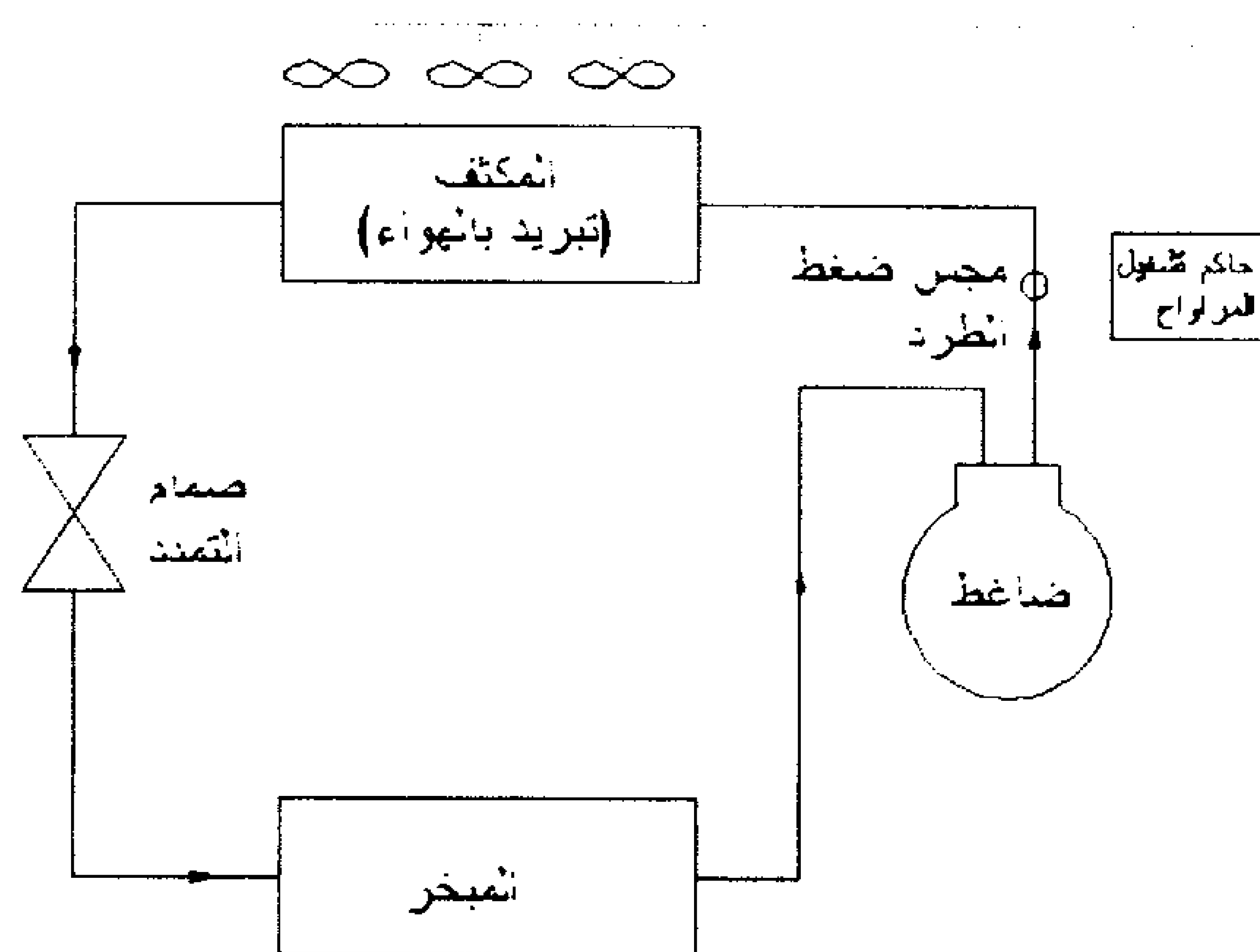
التحكم في تشغيل مراوح المكثف

يوجد في بعض التطبيقات الكبيرة (خصوصا في الأجواء الباردة) لدورات التبريد حاكم للتحكم في تشغيل مراوح المكثف المبرد بالماء، وذلك للمحافظة على عدم تجاوز الحد الأدنى لضغط الطرد في الدائرة ضماناً لعمل الدورة بشكل سليم، وللمحافظة على فرق ضغط مناسب لصمام التمدد. يقوم هذا النوع من الحاكمات بالتحكم في تشغيل مراوح المكثف تبعا لضغط الطرد حسب ما يتم

برمجته. فبفرض أن للمكثف ثلاث مراوح فإن الحاكم تبعا لقيمة ضغط الطرد المقاس يرسل إشارة لتشغيل أو إيقاف المراوح. فلو قل الضغط عن حد السماح الأول يتم تشغيل مروحة واحدة فقط، وعندما يكون الضغط بين حد السماح الأول وحد السماح الثاني يرسل إشارة لتشغيل مروحتين، وعندما يزيد ضغط الطرد عن حد السماح الثاني فيتم تشغيل الثلاث مراوح. ويساعد هذا النظام على ثبات ضغط الطرد ضمن مدى معين، ولكن يلزم التنويه هنا بتحسن قيمة معامل أداء دورة تبريد بانضغاط البخار كلما انخفض ضغط الطرد (أي كلما انخفضت درجة حرارة الجو الخارجي). ويوضح الشكل ١٠,١٠ دورة تبريد بها حاكم للتحكم في تشغيل مراوح المكثف تبعا لقيمة ضغط الطرد [McQuiston 2005].

حاكم ضغط زيت التزييت في الضاغط

يستخدم زيت التزييت في الضاغط لتوفير اللزوجة اللازمة لحركة أجزاء الضاغط. وللمحافظة على سلامة الضاغط عند انخفاض ضغط التزييت، يقوم مصنعو الضواغط بتركيب حاكم لقياس ضغط الزيت وإرسال إشارة عند انخفاض ضغط الزيت لإيقاف الضاغط.



شكل ١٠,١٠ حاكم تشغيل وإيقاف مراوح المكثف وحاكم ضغط الزيت.

دورة تخفيض الضغط

في هذه الدائرة يتم إعطاء فترة زمنية للاستمرار في تشغيل دائرة التبريد قبل إيقاف الضاغط، وفترة زمنية قبل تشغيل الضاغط. بدلا من إيقاف الضاغط حال وصول درجة حرارة المبخر لدرجة الحرارة المطلوبة، فإن الضاغط يظل يعمل ويتم تخزين وسيط التبريد في مستقبل مائع التبريد، كما هو موضح بالشكل ١٠,١١. عندما تستمر الدورة في العمل بهذه الصورة، فإن ضغط السحب ينخفض. يقوم حاكم ضغط السحب بإيقاف الضاغط عند وصول ضغط السحب إلى حد السماح الأدنى [McQuiston 2005, Dossat 1991].

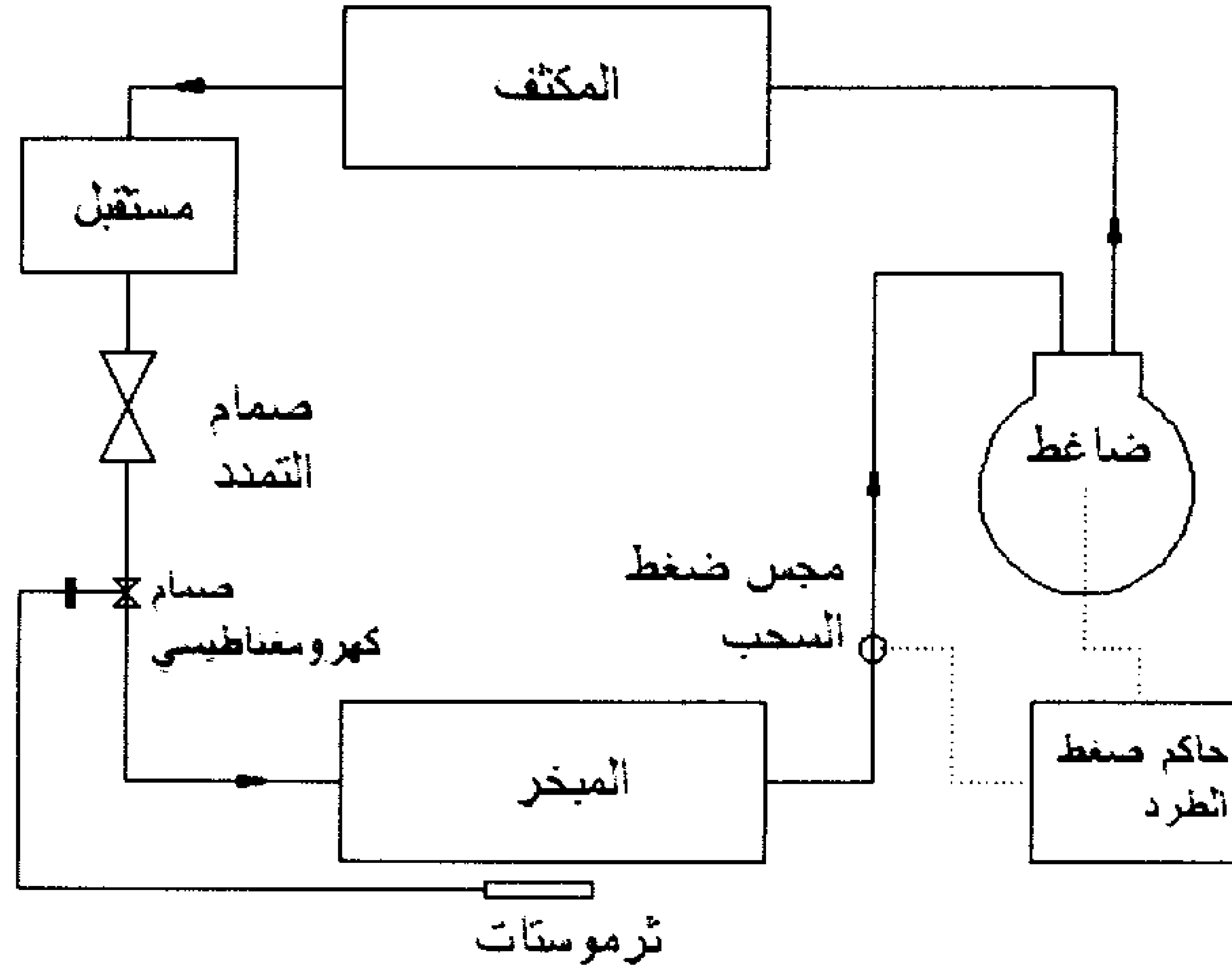
تقوم فكرة عمل هذه الدورة على وجود صمام كهرومغناطيسي (solenoid valve) بين المستقبل وصمام التمدد، كما يوضح الشكل ١٠,١١. ويقوم هذا الصمام باستقبال إشارة من مجس الحرارة (الثرموستات) في المبخر وتتم عملية خفض الضغط وإيقاف الوحدة كما يلي:

أ) عندما تصل درجة حرارة المبخر إلى حد السماح فإن الثرموستات يرسل إشارة للصمام الكهرومغناطيسي بالقفل ويستمر الضاغط بالعمل ويتم تخزين وسيط التبريد في المستقبل.

ب) نظرًا لوجود حاكم لضغط السحب، فإن هذا الحاكم يقوم بإيقاف الضاغط عند وصول ضغط السحب إلى حد السماح.

وفي حالة تشغيل الوحدة، فإن عملية التشغيل تتم كما يلي:

أ) عند ارتفاع درجة حرارة المبخر يرسل الثرموستات إشارة للصمام الكهرومغناطيسي بالفتح، مما يسمح بمرور وسيط التبريد من المستقبل إلى صمام التمدد، ومن ثم إلى المبخر، و يؤدي هذا إلى زيادة ضغط السحب.



شكل ١٠,١١ دورة خفض الضغط.

ب) عند ارتفاع ضغط السحب ووصولة إلى قيمة معينة حسب تصميم حاكم ضغط السحب فإنه يقوم بإرسال إشارة للضاغط بالبدء في التشغيل، ويمكن استنتاج أن دائرة خفض الضغط وإيقاف الوحدة تتميز بالآتي:

أ) كمية كبيرة لوسيط التبريد بالدائرة ويتم تخزين الزائد في مستقبل مائع التبريد.

ب) وجود فترة زمنية قبل إيقاف الضاغط للحد من تكرار تشغيل وإيقاف الضاغط.

١٠,٥,١ مكونات أخرى في دائرة التبريد

منظم ضغط المبخر

يستخدم منظم ضغط المبخر للحفاظ على ضغط المبخر من الانخفاض إلى حده الأدنى، حتى تكون درجة حرارة المبخر تقريبا ثابتة، ولا تصل إلى درجات

حرارة منخفضة، ويوضع هذا المنظم قبل الضاغط. ويسمى بـــ KVP تبعًا لشركة دانفوس [شركة دانفوس].

منظم ضغط المكثف

ويستخدم للمحافظة على ضغط المكثف عند مستوى ثابت، ويستخدم بكثرة في المناطق الباردة، وترمز شركة دانفوس له بـــ KVR [شركة دانفوس].

منظم ضغط السحب (منظم حفظ صندوق المرفق)

ويوضع على خط السحب لوقاية الضاغط عند زيادة الحمل و ترمز شركة دانفوس له بـــ KVL.

صمام لا عودة (لا مرجعي) NRV

وهو صمام يسمح بمرور وسيط التبريد في اتجاه واحد فقط.

صمام الضغط الفرقي (NRD)

ويستخدم لضمان ضغط كاف في خزان السائل (المستقبل).

ويوضح الشكل ١٠,١٢ دائرة تبريد مع مكوناتها لمخزنين تبريد أحدهما عند درجة حرارة فوق الصفر والآخر تحت الصفر، وتظهر المنظمات المختلفة على الدائرة. وتتكون الدائرة من مكثف واحد، وخزان لوسيط التبريد، ومبخرين يعملان على التوازي، أحدهما عند درجة حرارة فوق الصفر المئوي (تبريد) والآخر تحت الصفر (تجميد). ويقوم الضاغط بسحب وسيط التبريد من المبخرين. وقبل دخول وسيط التبريد إلى الضاغط تم وضع منظم حفظ المرفق KVL لحماية موتور الضاغط من زيادة الحمل. ويغادر الغاز الساخن تحت الضغط العالي إلى المكثف، حيث يتم تكثيف وسيط التبريد، وفي نهاية المكثف وقبل دخول سائل التبريد إلى المستقبل تم وضع منظم ضغط المكثف KVR

لضمان ثبات ضغط المكثف. كما يوجد حول المكثف (بين نقطة دخول وسيط التبريد للمكثف والمستقبل) صمام NRD لضمان وجود ضغط كافٍ في المستقبل.

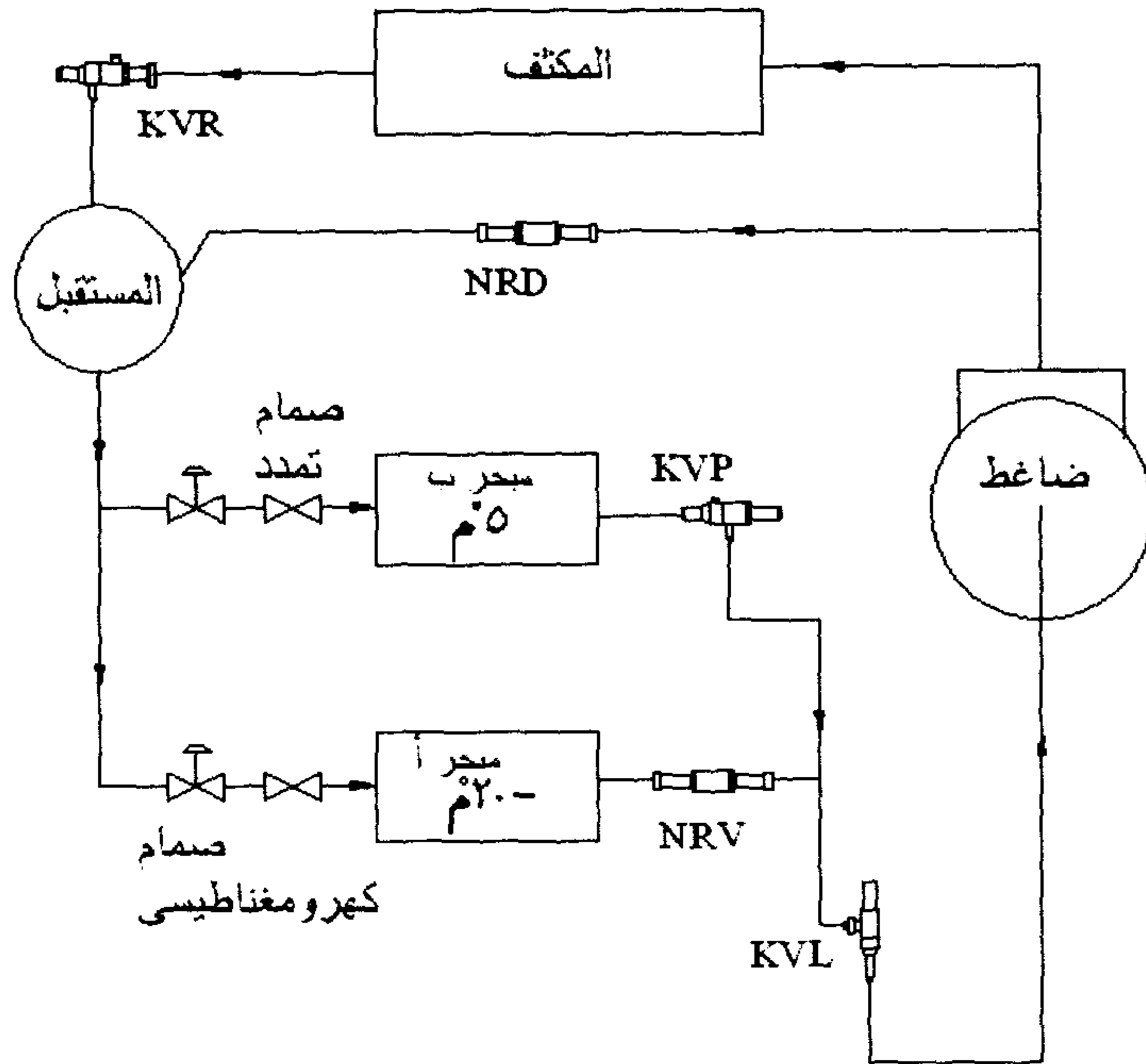
يتم تغذية المخزنين (أ) و(ب) من خزان وسيط التبريد عند درجتي الحرارة -٢٠ و ٥°م، وذلك من خلال صمام كهرومغناطيسي عند مدخل كل مبخر. يقوم كل صمام بتنظيم تدفق سائل وسيط التبريد إلى المبخر حسب درجة حرارة المبخر المطلوبة، حيث يرتبط عمل الصمام الكهرومغناطيسي بالفرق بين درجة حرارة المبخر ونقطة الضبط. يوجد صمام تمدد بعد الصمام الكهرومغناطيسي وقبل دخول الوسيط مباشرة إلى المبخر. ونظرًا لأن أحد المخزنين عند درجة حرارة -٢٠°م (ضغط متدني) لذلك لزم تركيب صمام غير رجعي NRV على خط الأنبوب الخارج من المبخر(أ). كما تم تركيب منظم لضغط المبخر(ب) كما هو واضح من الشكل ١٠,١٢. يتم خلط وسيط التبريد الخارج من المبخر (أ) و المبخر (ب)، ومن ثم يمر الوسيط على منظم KVL [شركة دانفوس].

١٠,٦ أجهزة القياس والاستشعار

لغرض التحكم يتم قياس بعض المتغيرات، مثل: درجة الحرارة، ورطوبة الهواء، والضغط في بعض تطبيقات التبريد وتكييف الهواء، وفيما يلي نستعرض بعض المجسات المستخدمة في قياس هذه المتغيرات [Holman 2001, Figliola *et al.* 2006]:

١٠,٦,١ مجسات قياس درجة الحرارة

يمكن قياس درجة الحرارة بعدة طرق سنبين بعضًا منها في ما يلي:

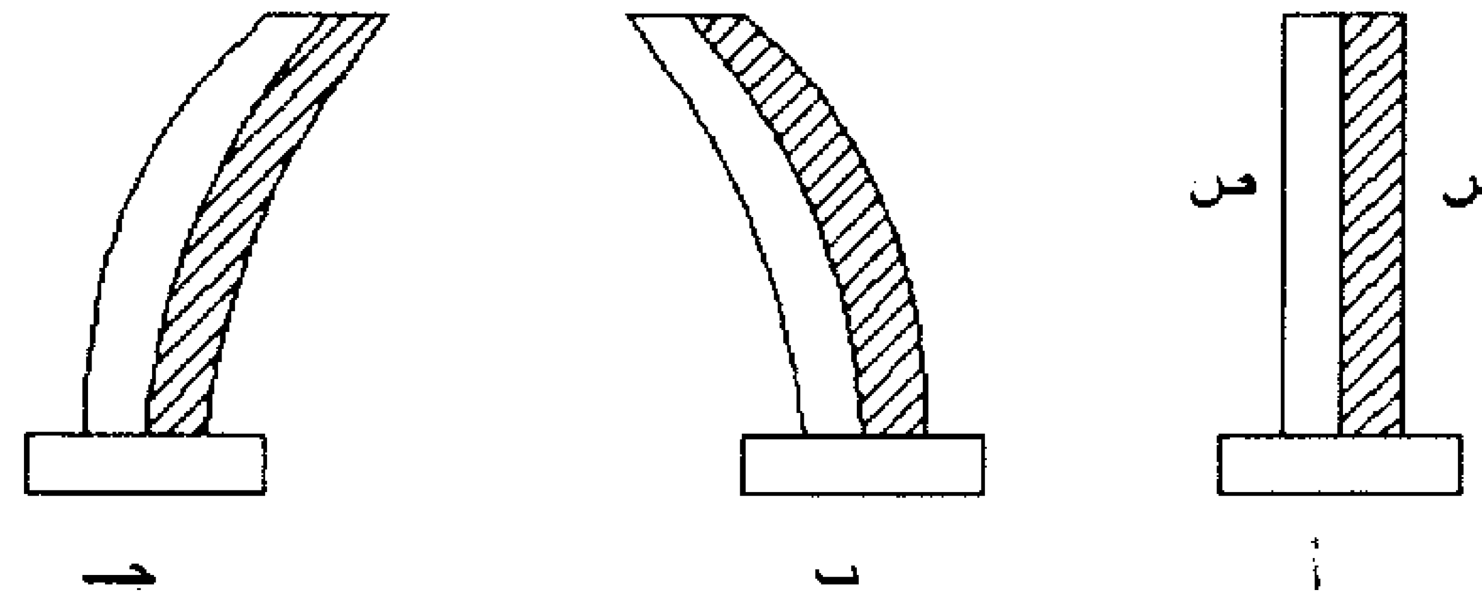


شكل ١٠,١٢ منظمات ومحكمات في دائرة تبريد بها مخزنين تبريد عند درجتي حرارة مختلفتين.

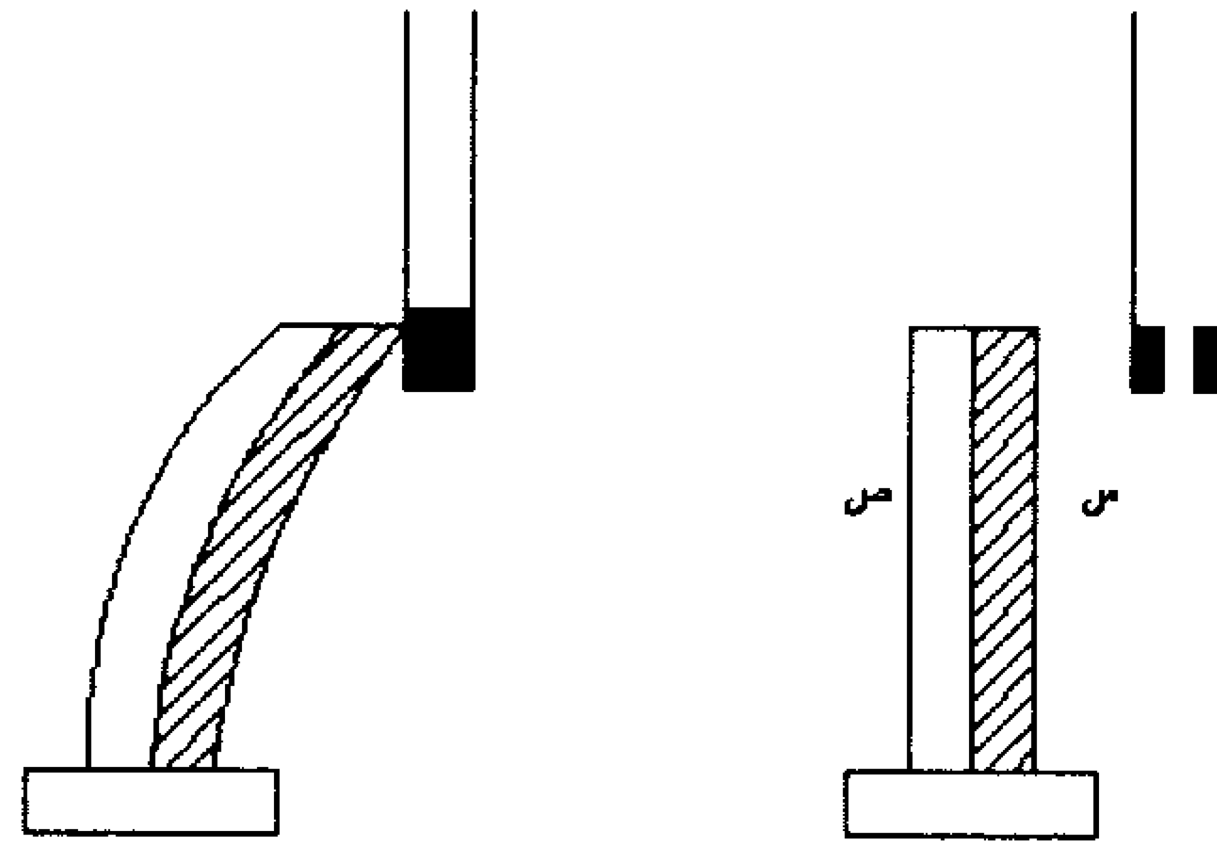
ثنائي المعدن (Bimetallic)

هنا يتم لصق معدنيين مختلفي معاملي التمدد عند درجة حرارة مرجعية T، حيث يكون لأحدهما معامل تمدد طولي كبير مقارنة بالأخر. فمثلا بالرجوع إلى شكل ١٠,١٣(أ)، نفترض أن معامل التمدد للمعدن (س) أكبر من معامل التمدد للمعدن (ص). عند تعرض هذا الثنائي إلى جو درجة حرارته مرتفعة. ينحني ثنائي المعدن نظرًا لاختلاف معامل التمدد للمعدنين، كما يظهر في شكل ١٠,١٣ (ب). وكذلك عند تعرض الثنائي لدرجة حرارة منخفضة ينحني ثنائي المعدن كما يظهر في الشكل ١٠,١٣ (ج). ويستفاد من هذا التمدد في تمرير أو عزل التيار الكهربائي عن أي معدة. يوضح الشكل ١٠,١٤ تطبيقًا لاستخدام ثنائي المعدن في إيقاف أو تشغيل ضاغط على سبيل المثال. نظرًا لكثرة الحالات

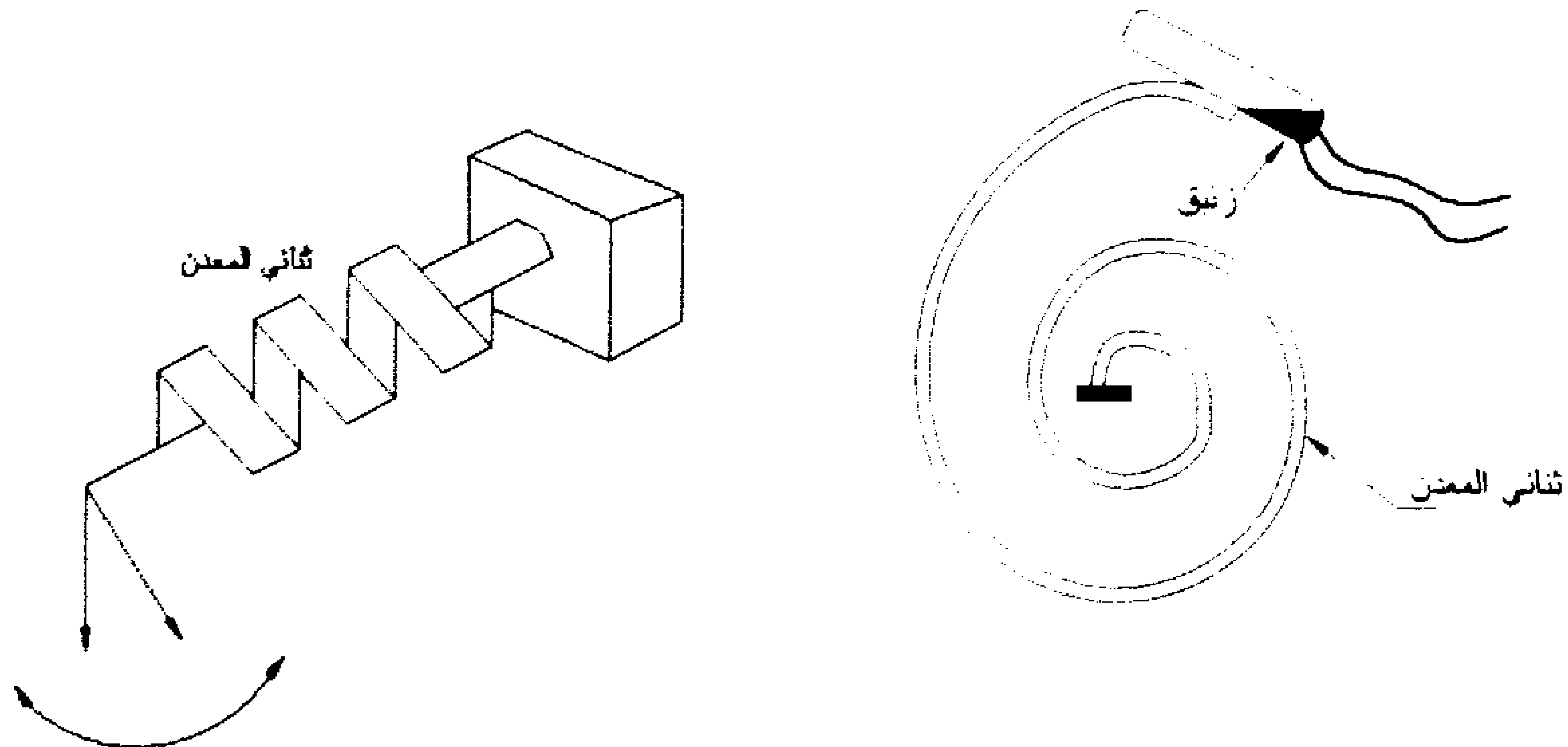
التي يتم فيها التحكم في درجات الحرارة، فهناك أنواع مختلفة من الثرموستات، ويبين الشكلان ١٠,١٤ و ١٠,١٥ أنماط مختلفة للثرموستات [Figliola *et al.* 2006].



شكل ١٠,١٣ ثنائي المعدن.



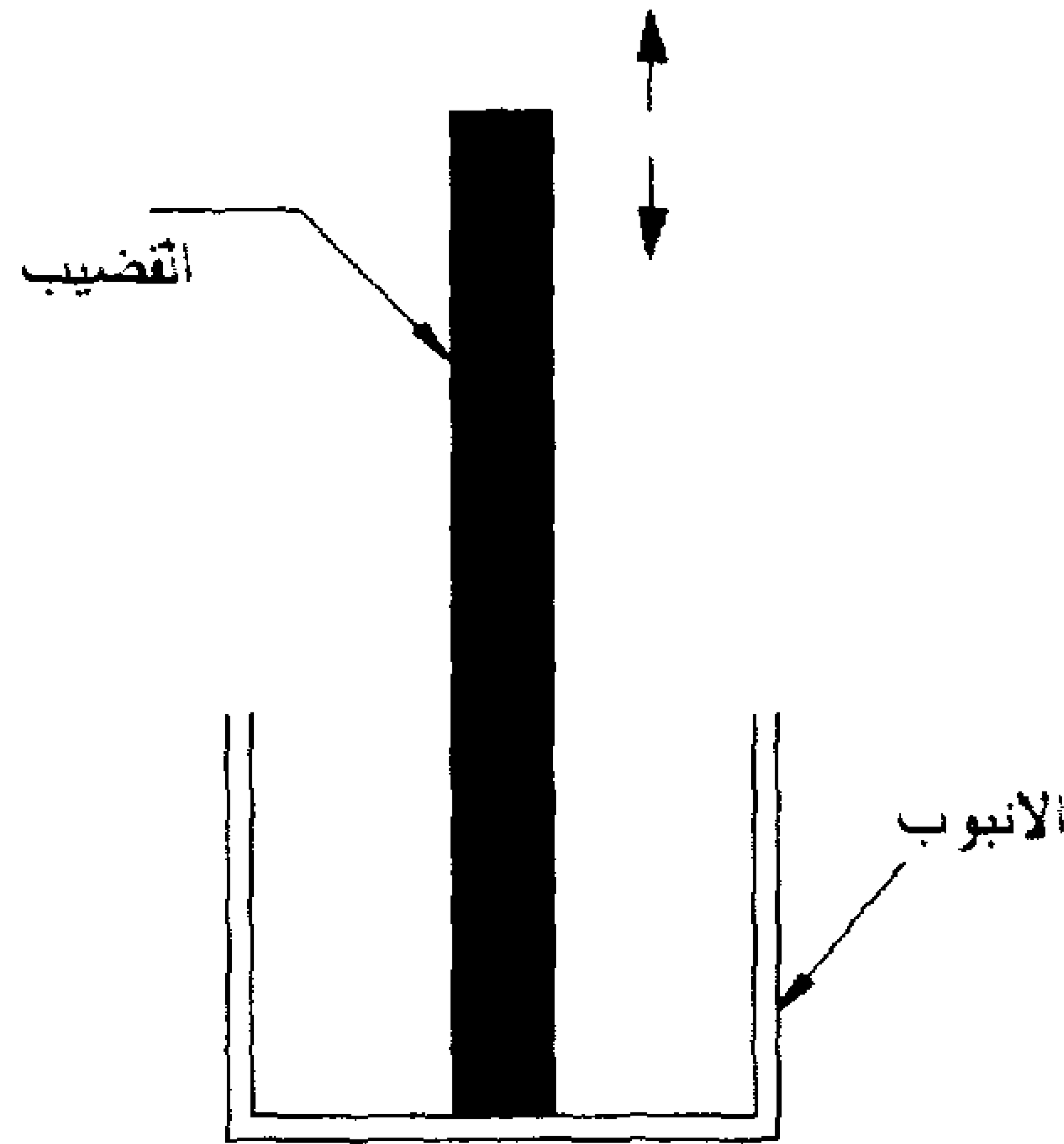
شكل ١٠,١٤ استخدام ثنائي المعدن في إيقاف أو تشغيل موتور كهربائي.



شكل ١٠,١٥ أشكال أخرى للثرموستات باستخدام ثنائي المعدن.

القضيب والأنبوب

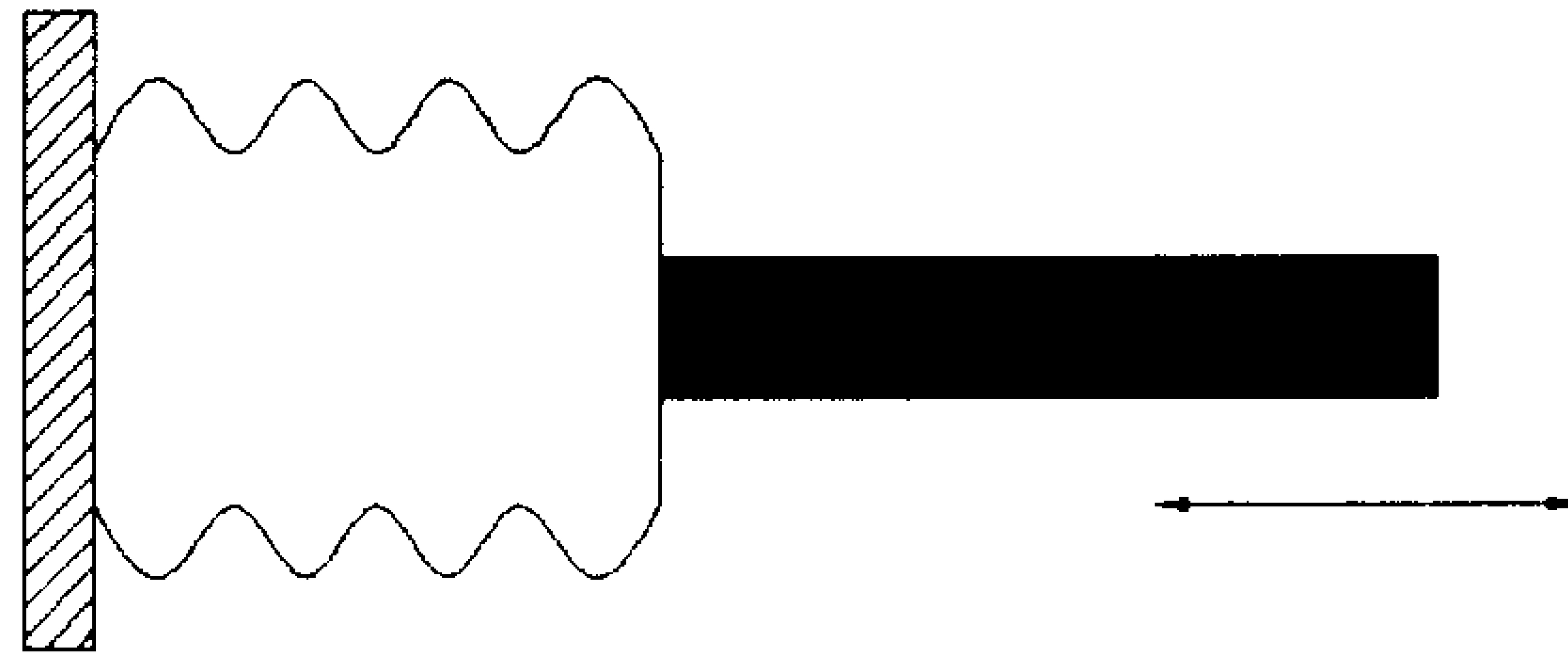
يتكون هذا المجس من أنبوب ذي معامل تمدد كبير، وقضيب معدني ذي معامل تمدد صغير. عند تعرض الأنبوب لدرجة حرارة مختلفة عن القيمة المرجعية، فإن تمدد أو انكماش الأنبوب يؤدي إلى تحرك القضيب. يتم الاستفادة من حركة القضيب في التحكم. يوضح الشكل ١٠,١٦ فكرة عمل هذا النوع من مجسات درجة الحرارة.



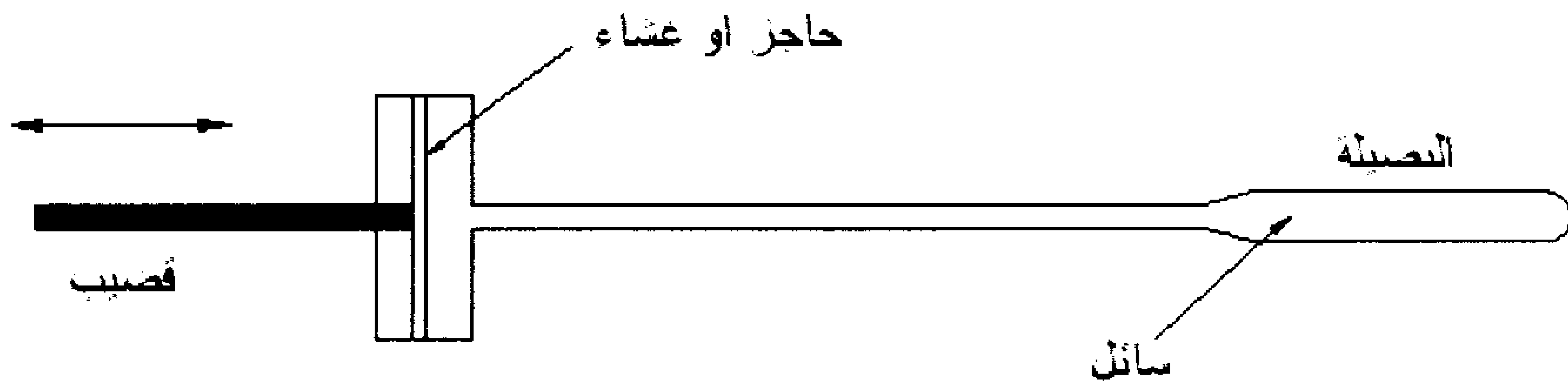
شكل ١٠,١٦ فكرة عمل مجس درجة الحرارة من نوع الأنبوب والقضيب.

المنفاخ والبصيلة (Bellow & Bulb)

هنا يتم ملء منفاخ بسائل أو بخار ويتم توصيل المنفاخ بقضيب. عند تعرض المنفاخ لدرجات حرارة مرتفعة، يتمدد المنفاخ مما يؤدي إلى تحرك القضيب، انظر الشكل ١٠,١٧. ويمكن أيضا استخدام بصيلة متصلة بمنفاخ وقضيب أو يتم توصيلها بغشاء (حاجز) وقضيب، كما هو موضح في شكل ١٠,١٨ [أساسيات التحكم، Althouse *et al.* 1992].



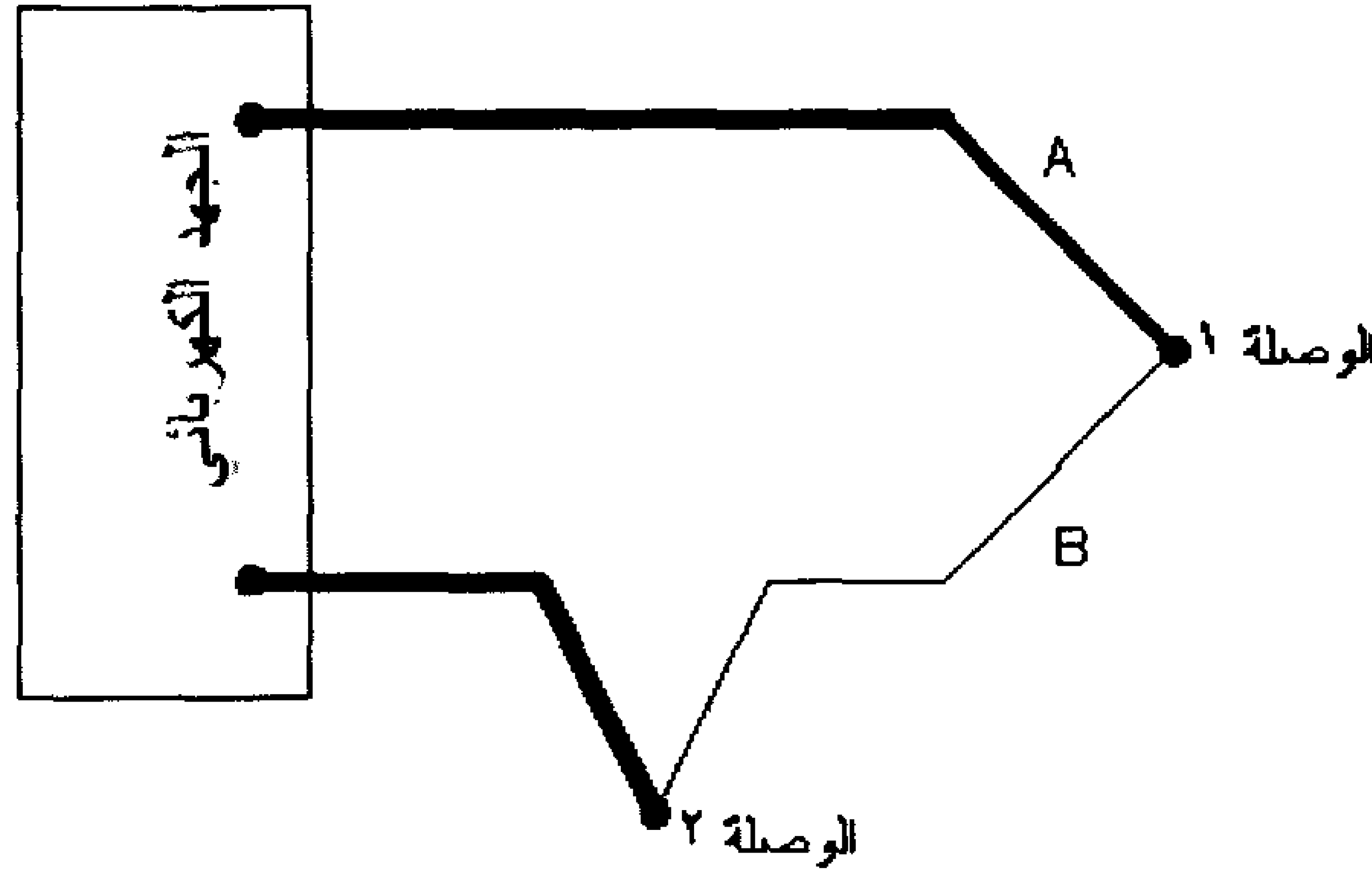
شكل ١٠,١٧ قياس درجة الحرارة باستخدام المنفاخ.



شكل ١٠,١٨ قياس درجة الحرارة باستخدام البصيلة.

الازدواج الحراري (Thermocouple)

عند توصيل طرفي معدنين مختلفين وتعريض هذه الوصلة لدرجة حرارة مختلفة عن وصلة الطرفين الآخرين، فإنه يتولد جهد (حث) كهربائي يتناسب مع الفرق في درجتي الحرارة. وبسبب هذه العلاقة المميزة بين الجهد الكهربائي ودرجة الحرارة يسمى هذان المعدنان بالازدواج الحراري الذي يعرف أيضا في بعض الأحيان بالسلك الكهروحراري. وكما موضح في شكل ١٠,١٩ توضع الوصلة الأولى في الموضع المراد قياس درجة الحرارة وتحفظ الوصلة الأخرى عند درجة حرارة مرجعية (في العادة تستخدم درجة حرارة صفر مئوي أو درجة تجمد الماء) ويكون الجهد المقاس متناسبًا مع الفرق بين درجتي الحرارة $(T_2\text{-}T_1)$.



شكل ١٠,١٩ الازدواج الحراري.

ويوجد أنواع مختلفة من الازدواجات الحرارية تعمل عند مدى مختلف لقياس درجات الحرارة وبدقة متفاوتة. يبين الجدول ١٠,١ بعض أنواع الازدوجات الحرارية المستخدمة تجاريًا والمدى المقترح لاستخدامها والطرف الموجب لكل منها. ومن المعروف تميز كل نوع تجاري مستخدم من الازدواجات الحرارية بحرف مميز. فعلى سبيل المثال يعرف الازدواج الحراري المكون من النحاس والكونستانتان بالنوع T، انظر الجدول ١٠,١.

وتستخدم الازدواجات الحرارية بكثرة في مختلف التطبيقات الهندسية والصناعية.

جدول ١٠,١ بعض خواص والمدى الحراري لبعض الازدواجات الحرارية [Figliola *et al.* 2006].

النوع	المعدنان المكونان للازدواج الحراري	الطرف الموجب	مدى درجة الحرارة المقترح للاستخدام
E	كروميل-كونستانتان	كروميل	أقل من ١٠٠٠°م
J	حديد - كونستانتان	حديد	أقل من ٧٦٠ °م
K	كروميل-الوميل	كروميل	أقل من ١٣٧٠°م
S	بلاتين ١٠٪ راديوم- بلاتين	بلاتين ١٠ راديوم	أقل من ١٧٦٨°م
T	نحاس-كونستانتان	نحاس	أقل من ٤٠٠°م

قياس درجة الحرارة باستخدام المقاومة الحرارية (RTD)

تتغير مقاومة الموصل الكهربائي مع درجة الحرارة، ولذلك يمكن عن طريق قياس المقاومة الكهربائية معرفة درجة الحرارة. فعند استخدام مواد تزداد مقاومتها الكهربائية مع درجة الحرارة، يمكن تقريب العلاقة بين درجة الحرارة والمقاومة الكهربائية بالمعادلة الآتية

$$R = R_o(1 + \alpha T) \qquad (10.4)$$

حيث R_o هي مقاومة السلك عند درجة حرارة مرجعية T_o ، و α هي معامل درجة الحرارة بالنسبة للمقاومة. و تعتمد α على نوع المعدن المستخدم، فمثلا تساوي ٠,٠٠٣٩٢٧(١/°م) للبلاتين، ويمكن الرجوع لأحد مراجع القياسات الحرارية [Holman 2001, Beckwith and Marangoni 1990] للمزيد من المعلومات حول قياس درجة الحرارة عن طريق قياس المقاومة الكهربائية.

الثيرمستر (Thermistor)

يتكون الثيرمستر من مادة شبه موصلة – مثل السيرميك – حيث تقل مقاومة هذه المادة مع ارتفاع درجة الحرارة (على عكس RTD). ويستخدم الثيرمستر عند الرغبة في قياس درجة الحرارة بسرعة استجابة أكبر من تلك الخاصة بمجس RTD. وتبين المعادلة الآتية العلاقة بين المقاومة الكهربائية ودرجة الحرارة

$$R = R_o e^{(1/T - 1/T_o)} \qquad (10.5)$$

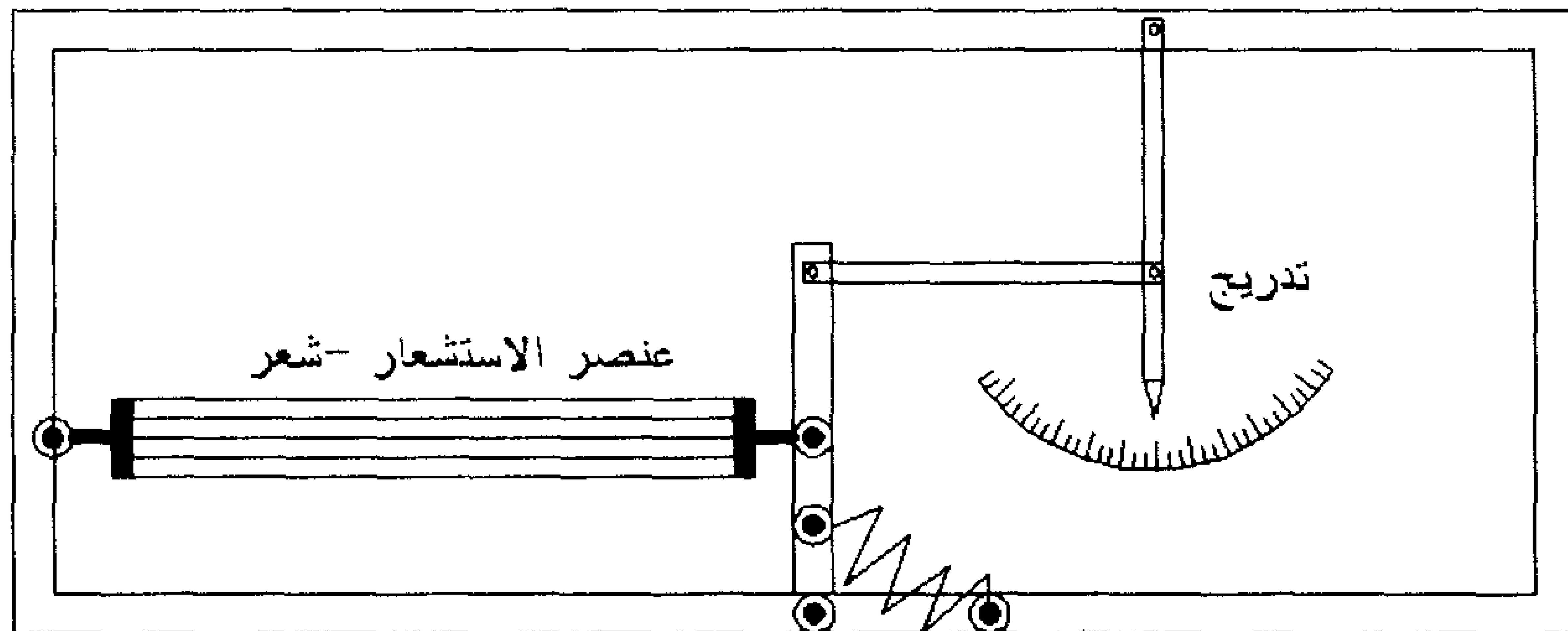
حيث R_o هي مقاومة الثيرمستر عند درجة حرارة مرجعية T_o. ويلزم أن تكون T و T_o بالدرجة المطلقة.

١٠,٦,٢ قياس الرطوبة النسبية للهواء

كما سبق الحديث في الفصل الثالث، يتكون الهواء الرطب من الهواء الجاف (الغازات المختلفة مثل: الأكسجين وثاني أكسيد الكربون وغيرهما) وبخار الماء. عندما تصل كمية بخار الماء في الهواء إلى الحد الأقصى يصبح الهواء مشبعا (أي إن الرطوبة النسبية تساوي ١٠٠ ٪، وعندما يكون الهواء جافًا لا يحتوي على بخار ماء فإن الرطوبة النسبية تساوي ٠ ٪. ويعرف الجهاز الذي يقيس الرطوبة النسبية بالهيغروميتر (Hygrometer).

يمكن قياس الرطوبة النسبية للهواء باستخدام مواد تتغير خواصها مع تغير الرطوبة. وتقسم أجهزة قياس الرطوبة النسبية إلى أجهزة تستخدم تغير الخواص الميكانيكية، وتسمى الهيغروميتر الميكانيكية، وأجهزة تسمى هيغروميترإلكترونية، حيث يتم الاستفادة من تغير الخواص الكهربائية مثل المقاومة (resistance) أو السعة (capacitance) مع الرطوبة النسبية.

يستخدم الهيغروميتر الميكانيكي مادة تتمدد بارتفاع نسبة الرطوبة مثل شعر الإنسان أو شعر الحيوان أو الخشب أو النايلون. و يوضح الشكل ١٠,٢٠ فكرة عمل الهيغروميتر الميكانيكي [أساسيات التحكم].



شكل ١٠,٢٠ فكرة عمل الهيغروميتر الميكانيكي.

يتوفر حاليا أنواع إلكترونية ومتحركة لقياس الرطوبة تعتمد على تغير المقاومة الكهربائية أو السعة الكهربائية مع نسبة الرطوبة. تستخدم هذه الأجهزة لقياس الرطوبة النسبية مباشرة أو تسجيل تغيرها مع الزمن، وينبغي الإشارة إلى أنه يمكن قياس الرطوبة النسبية عن طريق قياس أي درجتين من درجات الحرارة الآتية: درجة حرارة البصيلة المبتلة، ودرجة حرارة البصيلة الجافة، ودرجة حرارة نقطة الندى، ومن ثم إرسال إشارة بقيمة الرطوبة النسبية.

١٠,٦,٣ أجهزة قياس الضغط

يتم قياس الضغط الجوي بالباروميتر (Barometer) وأبسط أشكاله عبارة عن أنبوب مفتوح من أحد جانبية يملأ بسائل له كثافة معينة ثم يغمس مقلوبا في نفس السائل بدون أن نعرض الجانب المفتوح للهواء. يصبح ارتفاع السائل في الأنبوب عبارة عن قياس للضغط للجو باستخدام المعادلة

$$P = \rho g h \qquad (10.6)$$

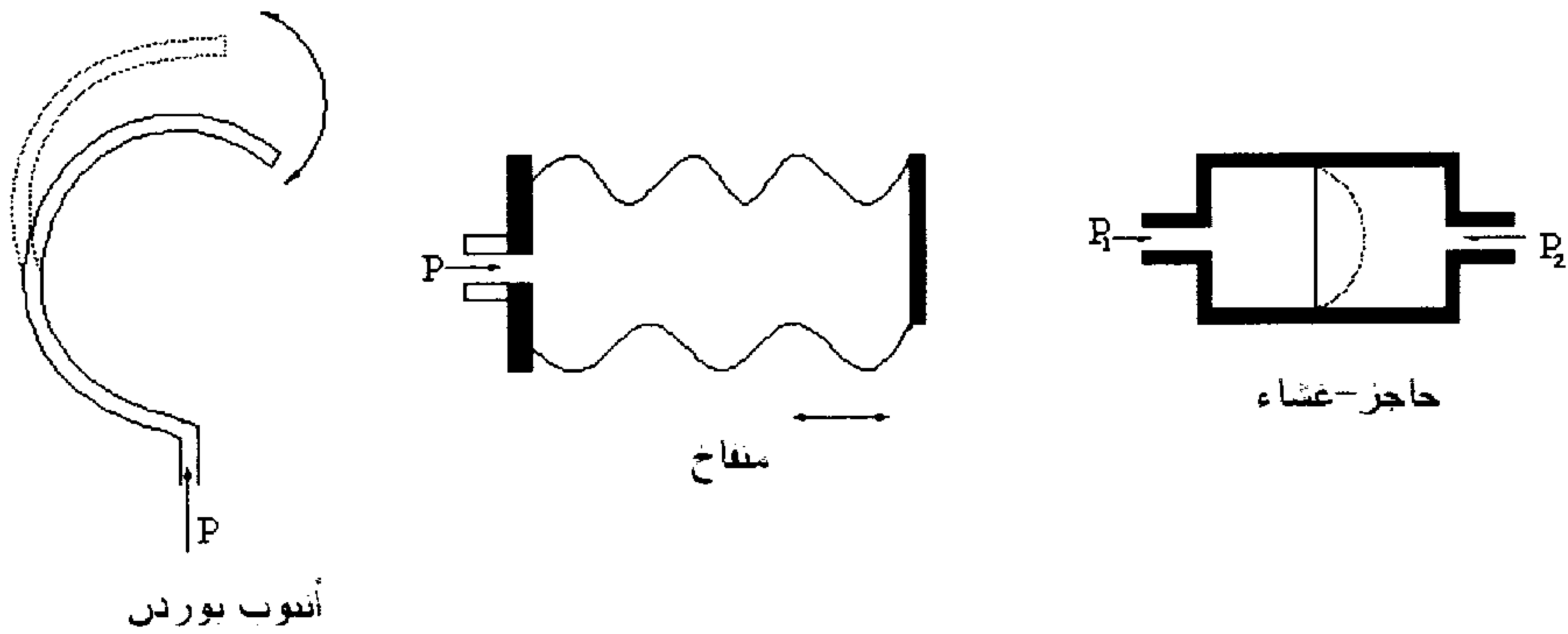
حيث ρ كثافة السائل، و g عجلة الجاذبية الأرضية، وh ارتفاع السائل في الأنبوب.

ويمكن أيضا قياس فرق الضغط باستخدام المانوميتر (Manometer)، وهو ببساطة أنبوب على شكل حرف U. توصل فتحة أحد الساقين لضغط معروف والآخر يوضع في المكان المراد قياس ضغطه.

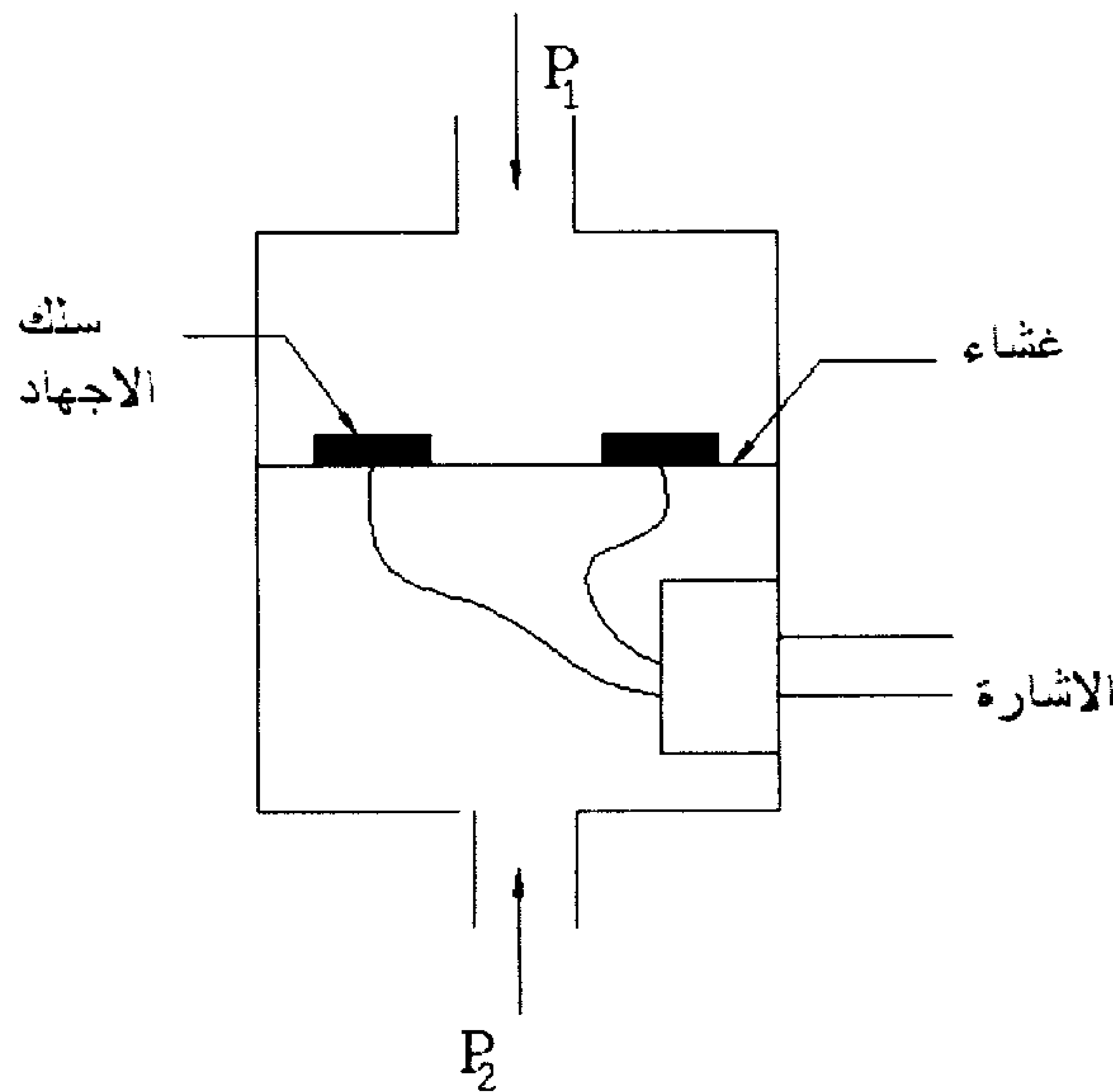
وفيما يخص التحكم فإن أجهزة قياس الضغط تؤدي إلى حركة مرنة. يوضح الشكل ١٠,٢١ بعضًا من أشكال الأجهزة التي تستخدم لقياس الضغط [Figliola *et al.* 2006] .

ويعتبر سلك الانفعال (strain gauge) واحدًا من أجهزة قياس الضغط الشائعة الاستخدام. ويعمل هذا الجهاز على ترجمة الحركة بسبب فرق الضغط

إلى إشارة كهربائية (فولت أو تيار). ويبن الشكل ١٠,٢٢ جهاز قياس للضغط عبارة عن غشاء معرض جانبية لضغطين مختلفين، ويستخدم سلك الانفعال لتوليد إشارة كهربائية تتناسب مع الفرق في الضغطين، وذلك تبعا لحركة الغشاء الفاصل بين الضغطين.



شكل ١٠,٢١ بعض أجهزة قياس الضغط.



شكل ١٠,٢٢ جهاز قياس الضغط باستخدام سلك الإجهاد.

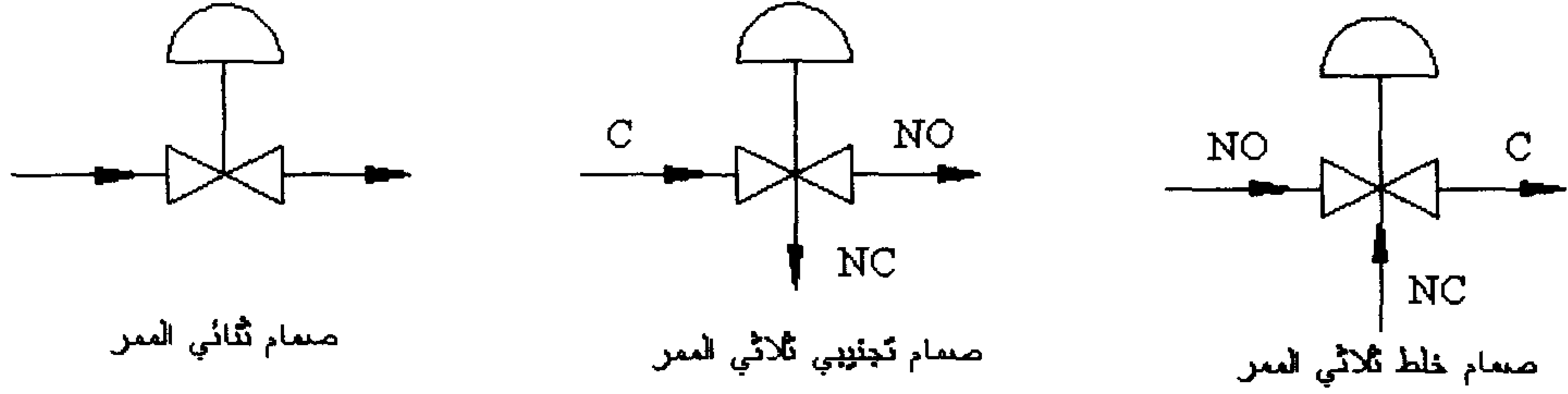
١٠,٧ أجهزة التحكم (Controlled Devices)

يرسل الحاكم إشارة إلى جهاز التحكم الذي يعمل للوصول بالمحكوم إلى قيمة نقطة الضبط. تقسم أجهزة التحكم تبعا لوسيط التحكم إلى عدة أقسام. تصل إشارة التحكم إلى المحرك أو المحفز (actuator) الذي يقوم فعليا إما عن طريق هواء مضغوط أو شغل كهربائي بتحريك أداة التحكم. في الغالب يكون وسيط التحكم إما سائل أو غاز. بالنسبة للسوائل وبخار الماء يمكن استخدام أحد أنواع الصمامات الآتية [Stoecker 1981]:

- صمام ثنائي الممر (two way valve)
- صمام خلط ثلاثي الممر (mixing three way valve)
- صمام تجنيبي ثلاثي الممر(diverting three way valve)

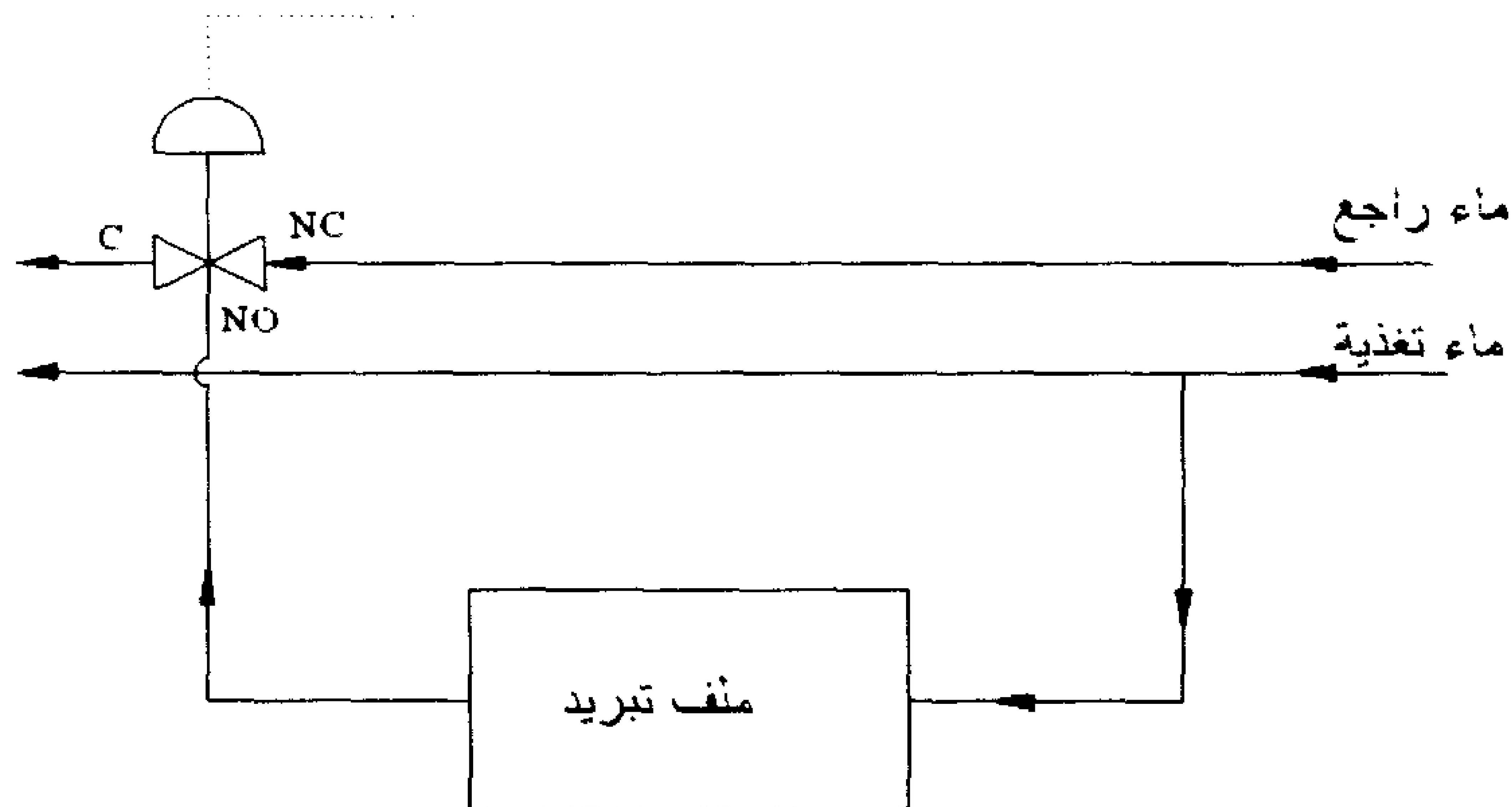
يبين شكل ١٠,٢٣ صمام ثنائي الممر أحدهما للدخول والآخر للخروج، أي إن السريان في اتجاه واحد. ويوضح شكل ١٠,٢٣ صمام خلط ثلاثي الممر له فتحتين للدخول وفتحة للخروج، ويتم خلط سريانين من وسيط التحكم للحصول على معدل السريان المرغوب فيه عند فتحة الخروج حسب إشارة التحكم التي يتلقاها الصمام. ويتم تميز حالة كل فتحة بالصمام عادة بأي من الحالات التالية: مقفول بالعادة (NC= Normally Closed)، ومفتوح بالعادة (NO= Normally Open)، ومشترك (C= Common). ففي الشكل ١٠,٢٣ للصمام الخلط ثلاثي الممر، فإن أحد فتحتيي الدخول للصمام تكون غالبا مفتوحة (NO) والأخرى مغلقة (NC) أما فتحة الخروج فتكون مفتوحة (C). وفي حالة عدم وصول أي إشارة من الحاكم للصمام فإن السريان يكون بين الفتحة (NO) والمشترك (C). وإذا استقبل الصمام إشارة بالتحرك، فإن مشغل الصمام (actuator) يتحرك لكي يتم خلط سريانين من فتحتي الدخول. يبين الشكل ١٠,٢٣ أيضا النوع الثالث من الصمامات وهو صمام تجنيبي ثلاثي الممر،

حيث يقوم هذا الصمام بتوزيع السريان القادم من فتحة الدخول إلى مخرجين حسب إشارة الحاكم.

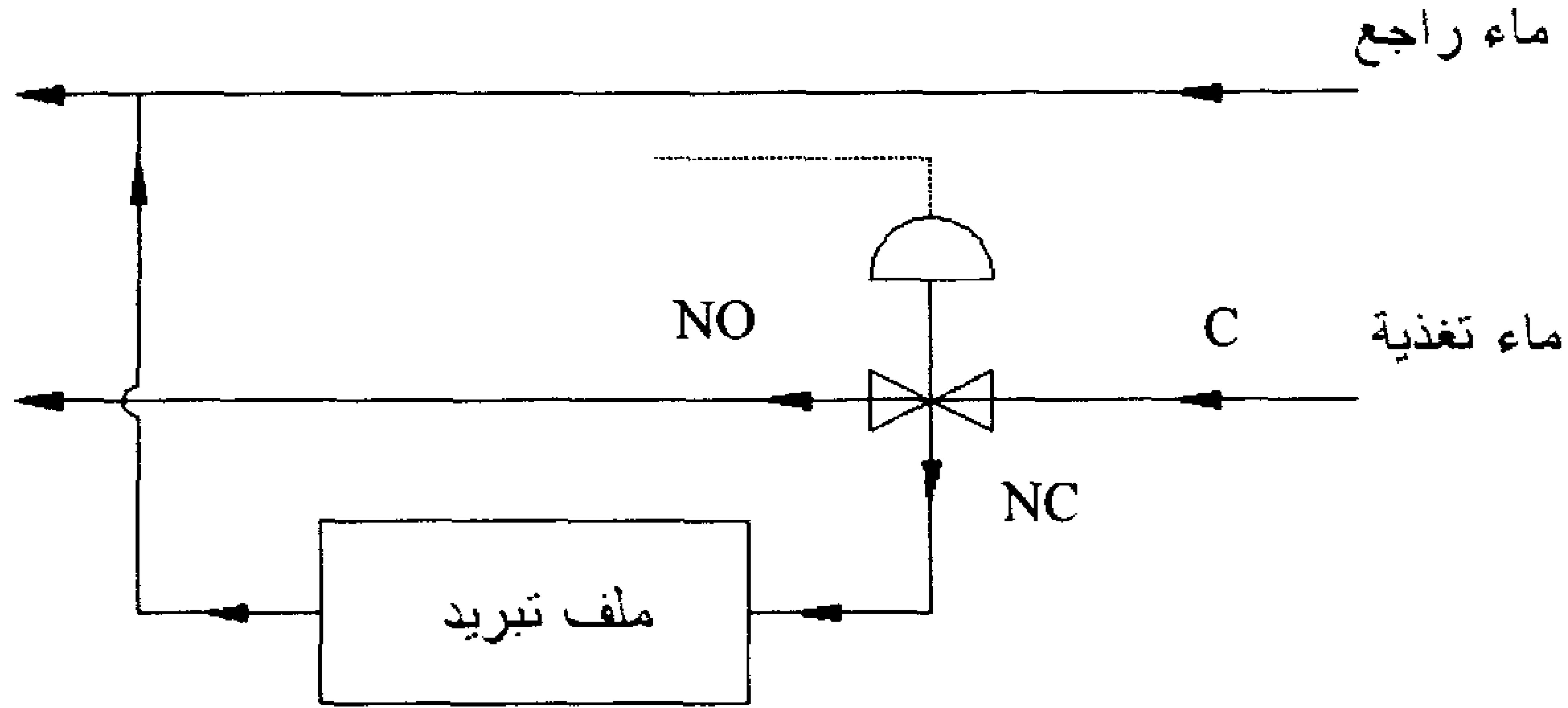


شكل ١٠,٢٣ أنواع صمامات التحكم في سريان السائل أو البخار.

كتطبيق على استخدام صمام الخلط ثلاثي الممر، يوضح الشكل ١٠,٢٤ ملف تبريد، حيث تم تركيب هذا النوع من الصمامات عند خروج الماء المثلج من الملف. يقوم الحاكم بالتحكم في الصمام لتمرير الكمية المرغوبة من الماء في الملف. لاحظ أن صمام الخلط تم تركيبه على خط الماء المثلج الراجع. بالمثل يمكن تركيب صمام تجنيبي ثلاثي الممر على خط ماء التغذية للملف، كما يوضح الشكل ١٠,٢٥، كي يؤدي نفس الغرض وهو التحكم في كمية الماء المثلج المار في ملف التبريد [Stoecker 1982].

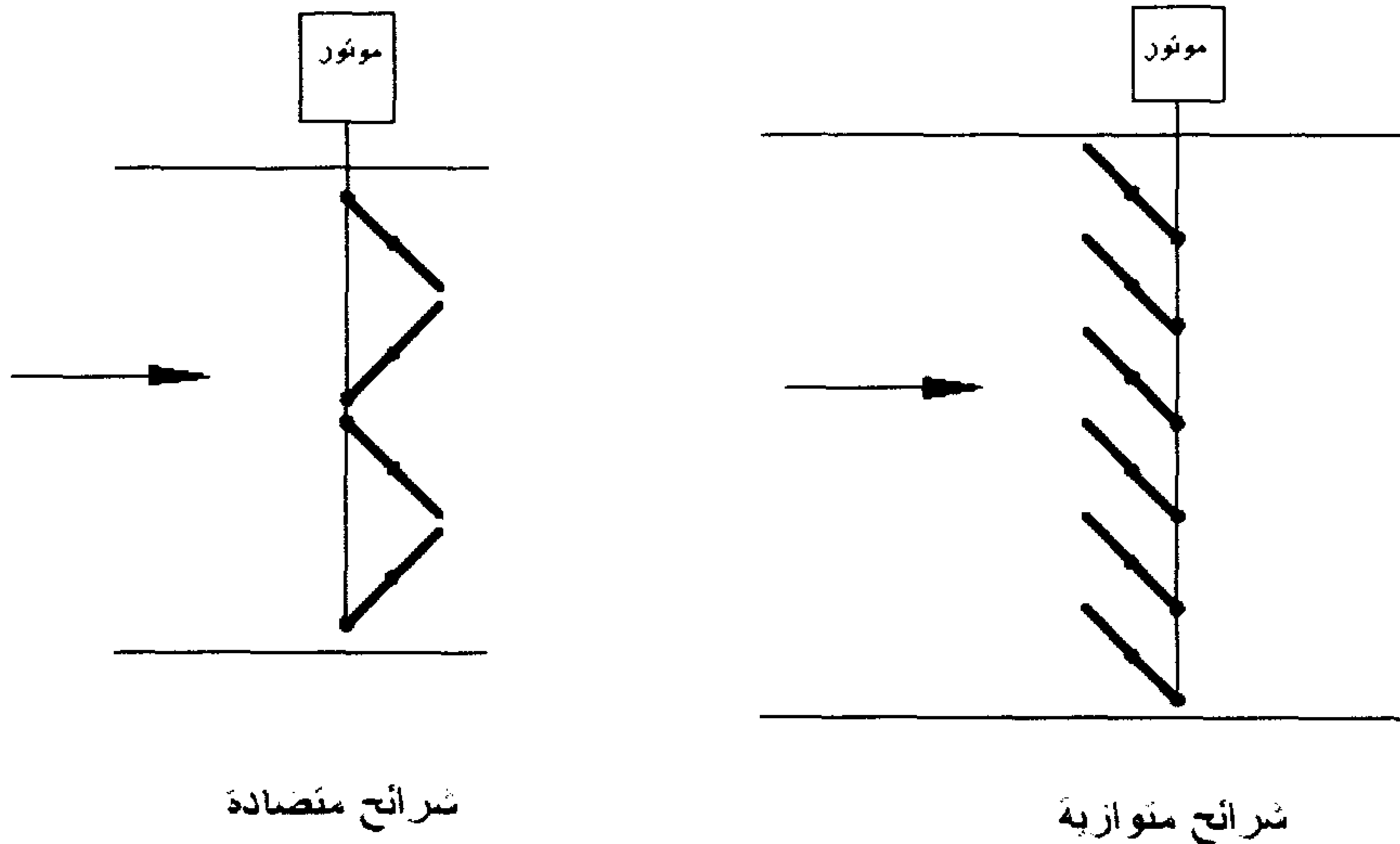


شكل ١٠,٢٤ تطبيق على استخدام صمام خلط ثلاثي الممر.



شكل ١٠,٢٥ تطبيق على استخدام صمام تجنيبي ثلاثي الممر.

يستخدم خانق الهواء (air damper) للتحكم في سريان الهواء. تقسم الخانقات حسب اتجاه الشرائح المصنوعة إلى خانقات بشرائح متوازية وخانقات بشرائح متضادة. يوضح الشكل ١٠,٢٦ هذين النوعين. وفي العادة تستخدم خانقات الهواء ذوات الشرائح المتضادة للتحكم المتغير في سريان الهواء، بينما تستخدم الخانقات من نوع الشرائح المتوازية في قفل وفتح سريان الهواء.



شكل ١٠,٢٦ خانقات الهواء.

١٠,٨ التحكم الرقمي

صاحب التقدم التقني المتسارع في مجالي الكمبيوتر والاتصال نموًا في القياسات والتحكم على مختلف المجالات والأصعدة، ومنها مجال التبريد وتكييف الهواء، واستخدم الكمبيوتر في العديد من مجالات التحكم، مما يسمح بمشاهدة وتغيير المتغيرات المختلفة، بل إن التحكم الرقمي شمل إدارة المنشأة (أو المبنى) بكل عناصره من تكييف وحراسة ومصاعد وأجهزة إنذار.

يعتبر المايكروبروسيسور هو العقل المدبر للكمبيوتر، إذ يتم عن طريقه استقبال الإشارة وتخزين البرنامج وتنفيذ الأوامر. ولأن المايكروبروسيسور لا يعرف إلا لغة الأرقام وبالأخص واحد وصفر، فإنه يلزم تحويل جميع الإشارات المتماثلة أو المتناظرة (analog) إلى إشارات رقمية (digital). ويبين الشكل ١٠,٢٧ [السيد وآخرون ١٩٩٤م] الأجزاء الرئيسية لنظام تحكم رقمي. وفيما يلي شرح لبعض المكونات الرئيسية مثل:

أ) المايكروبروسيسور (microprocessor) وهو شريحة إلكترونية بها عدد كبير من الترنزيستورات والدوائر الإلكترونية (transistors). ويمكن برمجة المايكروبروسيسور وحفظ البرنامج فيه، كما أن المايكروبروسيسور يستقبل إشارات ولديه القدرة على إرسال إشارات خارجية.

ب) محول من إشارة تماثلية إلى إشارة رقمية (analog/digital converter).

ج) محول من إشارة رقمية إلى إشارة تماثلية (digital/analog converter).

د) إشارات داخلة وخارجة (input/output singles).

في الشكل ١٠,٢٧ يتم التحكم في صمام المياه المثلجة لملف التبريد بناء على درجة حرارة الهواء الخارجة من ملف التبريد ومقارنتها مع نقطة الضبط. وحيث إن المايكروبروسيسور يستقبل ويرسل إشارات رقمية فقط، فإنه عند قياس درجة حرارة الهواء الخارج من ملف التبريد، وهي إشارة تماثلية، يتم تحويلها إلى إشارة رقمية باستخدام محول من إشارة تماثلية إلى إشارة رقمية (analog/digital converter). ويستقبل المايكروبروسيسور أيضا إشارة نقطة الضبط، وبعد مقارنة القيمتين وحسب برمجة المايكروبروسيسور يرسل إشارة رقمية لموجهة التحكم، ولكن قبل وصول هذه الإشارة إلى موجه التحكم يجب تحويل هذه الإشارة إلى إشارة تماثلية، لذلك يستخدم محول من إشارة رقمي إلى إشارة تماثلية (digital/analog converter).

شكل ١٠,٢٧ المكونات الرئيسية لدائرة التحكم الرقمي (السيد وآخرون ١٩٩٤م).

ينبغي الإشارة إلى أنه توجد أنواع مختلفة من المايكروبروسيسورات وتشترك في الخواص التالية:

أ) له قدرة على تخزين البرنامج، و يمكن إعادة البرمجة حسب الحاجة.

ب) تختلف عدد الإشارات الداخلة والخارجة من مايكروبروسيسور إلى آخر.

ج) قد يكون محول الإشارة من و إلى تماثلي/ رقمي مبني كجزء من المايكروبروسيسور.

د) يمكن ربط عدد من المايكروبروسيسورات مع بعضها الآخر.

هـ) برمجة المايكروبروسيسور ممكن عن طريق ربطه بشاشة ولوحة مفاتيح أو خلافه.

وهناك تزايد مستمر في تطبيق التحكم الرقمي في التكييف المباني وإدارتها، وفي كافة التطبيقات الصناعية التي بها عمليات تحكم ومتابعة وسيطرة. وأيضا في مخازن التبريد. وتزداد الحاجة للتحكم الرقمي في مخازن التبريد كلما كبر عدد مخازن التبريد واختلفت درجات حرارتها مع وجود محطة تبريد مركزية بها المعدات الميكانيكية. في هذه الحالة يمكن متابعة والتحكم في درجات الحرارة في كل المخازن من موقع مركزي واحد، ويشمل ذلك تشغيل وإيقاف الوحدات، والتحكم في درجات الحرارة، والتحكم في تشغيل دورة إذابة الصقيع.

الرموز ومعانيها للفصل العاشر

A ثابت خارج أداة التحكم
e الحيود أو الخطأ
K ثابت التحكم
O ناتج أداة التحكم
R المقاومة عند درجة الحرارة T [أوم]
R_o المقاومة عند درجة الحرارة المرجعية T_o [أوم]
T_r درجة حرارة الغرفة الداخلية [°م]

التذييل

D اشتقاقي
I تكاملي
o عند درجة الحرارة المرجعية T_o
P تناسبي

الحروف الإغريقية

α معامل تغير درجة الحرارة مع المقاومة الكهربائية [١/°م]

الفصل الحادي عشر

العزل الحراري وحاجز البخار

١١,١ مقدمة

يعتبر العزل الحراري من أهم العناصر التي تؤثر مباشرة في اقتصاديات تشغيل غرف التبريد. وبالرغم من وجود العديد من العوازل الحرارية إلا أن القليل منها الذي يستخدم في غرف التبريد. أيضا، يحتاج تركيب حاجز بخار الماء وصيانته في غرف التبريد إلى الكثير من اهتمام مهندس التصميم والتركيب والصيانة.

نقدم في الفصل الحالي الأنواع المختلفة من العوازل الحرارية المستخدمة في غرف التبريد والعوامل التي تدخل في المفاضلة بين هذه العوامل. كما نقدم بعد ذلك عرضا مختصر لحساب الحمل الحراري المنتقل سنويا خلال العازل إلى غرفة التبريد. ولاختيار سمك العازل الحراري، نقدم طريقتين لذلك. في الطريقة الأولى يحسب السمك الاقتصادي للعازل، أي السمك الذي يعطي أقل تكلفة سنوية، وتشمل هذه التكلفة : تكلفة شراء وتركيب العازل وتكلفة الطاقة الكهربائية اللازمة لإزالة الحمل الحراري المنتقل إلى غرفة التبريد خلال العازل. وفي الطريقة الثانية، يحسب سمك العازل تبعا للقيم الموصى بها في الحقل الهندسي عند تصميم غرف التبريد. وتعتمد هذه الطريقة على درجة حرارة غرفة التبريد فقط.

يشمل الجزء الأخير من الفصل الحالي عرضًا لأهمية حاجز البخار في غرفة التبريد واختياره وطرق تركيبه والاحتياطات الهندسية اللازمة لذلك. ونقدم

في آخر الفصل عرضًا لألواح العزل الحراري سابقة التصنيع التي أصبحت مؤخرا شائعة الاستخدام في غرف التبريد.

١١,٢ العوازل الحرارية المستخدمة في غرف التبريد

هناك العديد من العوازل الحرارية التي استخدمت في الماضي، والتي تستخدم حاليا في غرف التبريد. وتستخدم العوازل الحرارية لتقليل تأثير العوامل الخارجية المحيطة على حمل التبريد. فمن المعروف أن الحرارة المنتقلة خلال حوائط وسقف وأرضية غرف التبريد تمثل جزءًا من هذا الحمل. وباستخدام عزل حراري بالحوائط والسقف والأرضية يقل جزء حمل التبريد المنتقل خلال هذه الأسطح، مما يساعد على توفير الطاقة المستخدمة بنظام التبريد. وبزيادة المقاومة الحرارية للعزل الحراري المستخدم، يزيد توفير الطاقة. ويمتاز العزل الحراري بفوائد جانبية أخرى بالإضافة إلى توفير الطاقة. فمثلا، يساعد استخدام العزل الحراري على رفع درجة حرارة السطح الخارجي للحائط أو السقف إلى درجة حرارة أعلى من درجة حرارة نقطة الندى للجو المحيط، مما يمنع تكثف بخار الماء الموجود بالهواء الخارجي على هذه الأسطح. كما تساعد هذه العوازل إذا كان اختيارها صحيحا، على الحماية من انتشار الحرائق إذا ما شب حريق بأحد غرف التبريد. وتعمل العوازل أيضا في بعض الأحيان، كحاجز لانتقال بخار الماء والهواء من غرف التبريد إلى الخارج، وبالعكس، مما يساعد أيضًا على خفض حمل التبريد.

ويفضل عند اختيار عازل غرفة تبريد أن يكون له المميزات الآتية:

أ) أن يكون معامل التوصيل الحراري منخفضًا.

ب) أن يكون خفيف الوزن.

ج) أن يكون منخفض التكلفة.

د) ألا يسمح بانتشار النيران إذا ما شب حريق.

هـ) ألا يسبب أي تلوث بالهواء المحيط به، مما قد يسبب تلف المواد المحفوظة بغرفة التبريد أو أن يسبب ضررًا بالصحة العامة.

وبالطبع هناك العديد من العوازل التي يتوفر بها المميزات السابقة بدرجات متفاوتة. ويعتبر الفلين من أهم العوازل الحرارية التي استخدمت لفترات طويلة في الماضي لعزل غرف التبريد. أيضا، استخدمت نشارة الخشب في الماضي في العديد من غرف التبريد. إلا أنه استخدمت في السنوات الأخيرة منتجات البوليمرات، مثل البوليسترين والبوليورثين لعزل غرف التبريد بنجاح وأصبحت هي الأكثر استخداما في معظم الأحوال. وتتوفر هذه البوليمرات في عدة صور، منها ما يأتي على شكل ألواح صلبة، ومنها ما يتم صبه بالموقع بالمكان المطلوب عزله حراريا.

ويبين جدول ١١,١ قيمة الموصلية الحرارية لأهم العوازل الحرارية المستخدمة في مخازن التبريد [Raznjevic 1976, ASHRAE 1993].

١١,٣ انتقال الحرارة خلال العازل الحراري

من أهم الصعوبات التي يواجهها مصمم غرف التبريد هي اختيار سمك العزل الحراري المناسب للتطبيق. وللتعرف على هذه المشكلة دعنا نرجع إلى الفصل السابع، حيث قدمنا كيفية حساب حمل التبريد الناتج عن انتقال الحرارة بالحوائط والأسقف والأرضية. ويعطى هذا الحمل خلال سطح ما كما يلي:

$$\dot{Q}=U A \Delta T \qquad (11.1)$$

حيث U هي المعامل الكلي لانتقال الحرارة خلال السطح، وA هي مساحة السطح تحت الدراسة، وΔT هي فرق درجات الحرارة بين خارج الغرفة

وداخلها. ولقد بينا أيضًا أن U تعطى بدقة مقبولة إذا تم إهمال المقاومات الحرارية ماعدا المقاومة الحرارية بسبب العزل الحراري أي:

$$U=k_i/x_i \qquad (11.2)$$

جدول ١١,١ الموصلية الحرارية لبعض أنواع العوازل الحرارية عند صفر °م (Raznjevic 1976, ASHRAE 1993).

المادة	الكثافة كجم / م^3	الموصلية الحرارية وات / م. °م
ألياف زجاجية (glass fiber)	٥٦-٧٢	٠,٠٣٨ - ٠,٠٣٩
بوليسترين مشكل بالبثق (expanded polystyrene extruded)	٢٩ - ٥٦	٠,٠٢٩
بوليسترين مشكل بالقوالب (expanded polystyrene, molded beads)	١٦٠	٠,٠٣٧
	٢٠	٠,٠٣٦
	٢٤	٠,٠٣٥
	٢٨	٠,٠٣٥
	٣٢	٠,٠٣٣
بوليرويثين رغوي (polyurethane foam)	٢٤ - ٤٠	٠,٠٢٣ - ٠,٠٢٦
صوف زجاجي (Glass wool)	٥٠	٠,٠٣٧
فلين (ألواح) ، (cork ponds)	١٥٥	٠,٠٤١
قطن	٨١	٠,٠٥٦
نشارة خشب	٢٠٠	٠,٠٥٨

حيث k_i (وات /م.°م) هي الموصلية الحرارية للعازل و x_i (متر) هي سمكه. وتكمن صعوبة حساب القيمة السنوية للحرارة المنتقلة خلال العازل في تغير درجات الحرارة خارج غرفة التبريد من ساعة إلى ساعة خلال السنة. و تقدر الحرارة المنتقلة خلال العازل عند أي ساعة في اليوم من العلاقة التالية:

$$\dot{Q}_i = UA(T_i - T_R)/1000 \qquad (11.3)$$

حيث T_i هي متوسط درجة الحرارة الخارجية خلال الساعة و T_R هي درجة حرارة غرفة التبريد. لاحظ في المعادلة السابقة أنه تمت القسمة على ١٠٠٠

لتكون وحدات $\dot{Q}_i$ بالكيلووات. وبالطبع تكون $\dot{Q}_i$ قيمة موجبة في المعادلة السابقة إذا كانت T_i أعلى من T_R فيما يعني انتقال الحرارة إلى غرفة التبريد، أما إذا قلت درجة الحرارة T_i عن T_R فإن قيمة $\dot{Q}_i$ تصبح سالبة، مما يعني انتقال الحرارة من غرفة التبريد إلى الخارج.

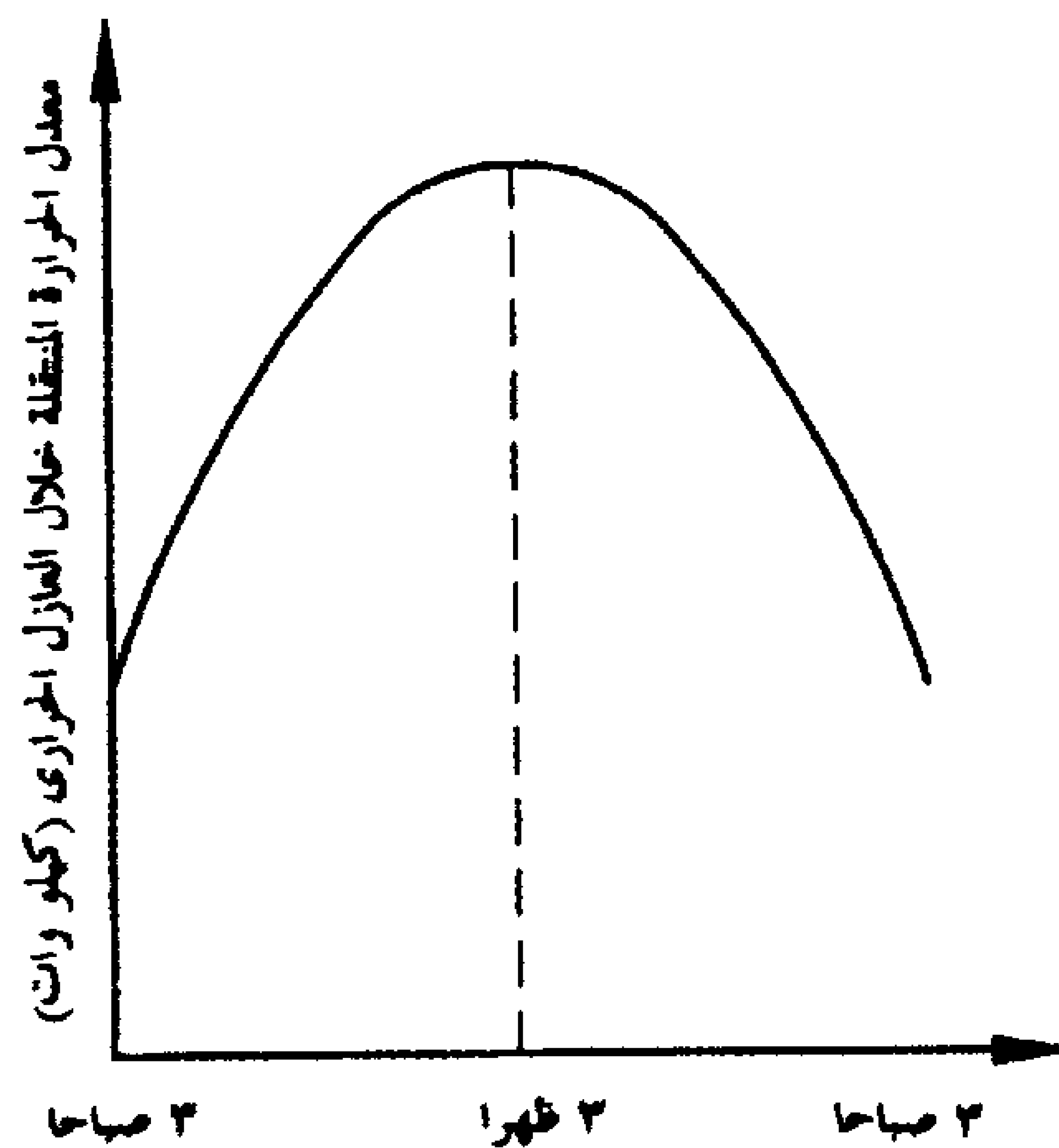
ويبين شكل ١١,١ تغير قيمة $\dot{Q}_i$ مع الساعة خلال اليوم. وتعطى إجمالي الطاقة الحرارية المنتقلة خلال العازل الحراري في اليوم كما يلي:

$$Q=\frac{1}{1000}\sum_{i=1}^{24}UA(T_i-T_R) \tag{11.4}$$

حيث U بوحدات (وات /م٢. ° م) و A بوحدات (م٢) وQ بوحدات (كيلووات-ساعة). فإذا فرضنا للسهولة أن اليوم تحت الدراسة، هو اليوم المتوسط للشهر، فإن إجمالي الطاقة الحرارية Q المنتقلة خلال العازل في السنة تعطى كما يلي:

$$Q_y=\sum_{j=1}^{12}N_j\sum_{i=1}^{24}\frac{UA(T_{i,j}-T_R)}{1000} \tag{11.5}$$

حيث تمثل N_j عدد الأيام في الشهر، ويمثل التذييل j ترتيب الشهر في السنة.



شكل ١١,١ مثال لتغير معدل الحرارة المنتقلة خلال عازل من خارج غرفة تبريد إلى داخلها مع الساعة خلال اليوم.

١١,٤ السمك الاقتصادي للعازل الحراري

بزيادة سمك العزل الحراري تنخفض قيمة معامل انتقال الحرارة U، وبالتالي تقل الحرارة المنتقلة خلاله سنويًا، مما يعني توفير الطاقة اللازمة لتشغيل ماكينة التبريد، إلا أن زيادة سمك العزل الحراري يعني زيادة تكلفته الأولية، لذا يلزم على المصمم الموازنة بين التكلفة الأولية للعازل وتكلفة تشغيل ماكينة التبريد، وسنوضح في الجزء التالي الطريقة المتبعة لذلك.

تمثل التكلفة الأولية للعازل ثمن شراء العازل وتكاليف تركيبه. لاختيار عازلا بسمك ما، دعنا نفرض أن تكلفته الأولية هي I دولار أمريكي* وأن العمر الافتراضي لهذا العازل هو n سنة، عندئذ تقدر التكلفة السنوية C_i (دولار أمريكي) كما يلي:

$$C_i = I \frac{s(1+s)^n}{(1+s)^n - 1} \qquad (11.6)$$

حيث s هي المعدل السنوي لغلاء الأسعار (كرقم عشري). بزيادة سمك العازل الحراري تزيد قيمة التكلفة الأولية I ، إلا أن هذه الزيادة لا تكون خطية، لذا يلزم أن يرجع المصمم إلى مصنعي العوازل الحرارية وإلى مقاولي الأعمال الهندسية لمعرفة التكلفة الأولية لها. ويبين الشكل ١١,٢ علاقة تغير التكلفة السنوية للعازل مع تغير السمك.

نفرض الآن أن ماكينة التبريد المستخدمة لها معامل أداء قدره COP، عندئذ تحتاج هذه الماكينة إلى طاقة كهربائية W_e (كيلووات- ساعة) لإزالة

---

* تم اختيار العملة هنا دولار أمريكي للتوضيح فقط، ولسهولة التحويل من عمله إلى أخرى.

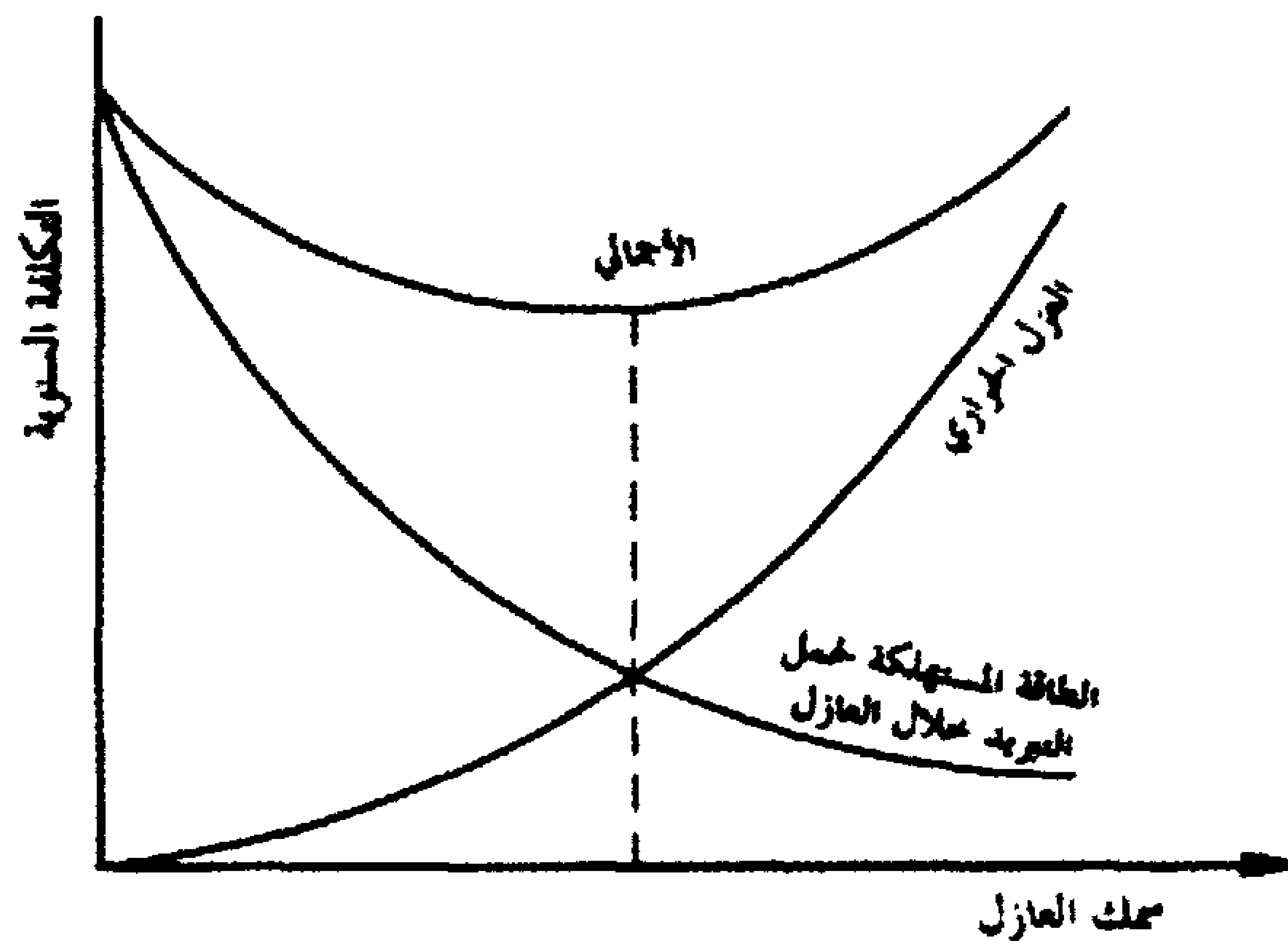
الحرارة المنتقلة إلى غرفة التبريد خلال العازل الحراري. وتقدر قيمة W_e من العلاقة الآتية:

$$W_e = Q_y / \text{COP} \tag{11.7}$$

فإذا كانت تكلفة الطاقة الكهربائية في موقع غرفة التبريد هو F (دولار/ كيلووات - ساعة) فإن التكلفة السنوية للطاقة الكهربائية المناظرة للحمل الحراري خلال العازل هي:

$$C_e = F\, Q_y / COP \tag{11.8}$$

ويوضح شكل ١١,٢ تغير التكلفة السنوية C_e للطاقة المستهلكة لحمل التبريد خلال العازل. ونلاحظ انخفاض هذه التكلفة بزيادة سمك العازل. وتكون التكلفة السنوية المناظرة للعازل هي إجمالي التكلفة السنوية للعازل والتكلفة السنوية للطاقة المستهلكة لحمل التبريد خلال العازل، أي إن:



شكل ١١,٢ تغير التكلفة السنوية لحمل التبريد المنتقل خلال العازل الحراري، والتكلفة السنوية للعازل الحراري والتكلفة السنوية الكلية مع سمك العازل الحراري.

$$C_t = C_i + C_e \tag{11.9}$$

ويبين شكل ١١,٢ تغير التكلفة الإجمالية مع سمك العازل. ويظهر من الشكل وجود سمك أمثل للعازل، حيث تكون التكلفة الإجمالية عند أدنى قيمة لها.

كما بينا سابقا، بزيادة سمك العازل الحراري تزيد تكلفته الأولية، إلا أن هذه الزيادة يصاحبها انخفاض تكلفة الطاقـــة الكهربائية اللازمة لإزالة الحمل الحراري. من هنا، نعرف عدد السنوات Y التي تسترد فيها الزيادة في تكلفة العزل الحراري نتيجة الوفرة في تكلفة الطاقة الكهربائية كما يلي:

$$Y=\frac{I-I_{ref}}{(C_e)_{ref}-C_e} \tag{11.10}$$

حيث التذييل ref يعنى القيمة الاسنادية، أي عند السمك الابتدائي للعازل الحراري.

١١,٥ استخدام الحاسب الآلي لحساب السمك الاقتصادي للعازل الحراري

بينا في الجزء ١١,٣ طريقة حساب مقدار الحمل الحراري السنوي Q_y المنتقل إلى غرفة التبريد سنويًا. كما بينا ضرورة معرفة درجة الحرارة الخارجية عند كل ساعة خلال اليوم المتوسط لكل شهر. وقد يكون هذا غير متاح لمهندس التصميم في بعض الأماكن. ويمكن لمهندس التصميم التغلب على هذه الصعوبة باستخدام العلاقة التقريبية الآتية:

$$T=\overline{T}+\frac{1}{2}\Delta T\cos\{15(t-15)\} \tag{11.11}$$

حيث T (°م) هي درجة الحرارة الخارجية عند الساعة t خلال اليوم، و $\overline{T}$ (°م) هي درجة الحرارة المتوسط لليوم، و ΔT (°م) هي المدى اليومي لتغير درجة الحرارة.

ويبين شكل ١١,٣ برنامج INSUL.FOR لحساب السمك الاقتصادي للعازل الحراري باستخدام المعادلات السابقة. ويحتاج البرنامج إلى ملف لإدخال بيانات التشغيل، ويسمى هذا الملف INSUL.IN. وتوضع نتائج تشغيل البرنامج في ملفين. الملف الأول هو INSUL.OUT ويحوي نتائج حسابات الحمل الحراري لكل شهر عند سماكات مختلفة للعازل الحراري. والملف الثاني هو INSUL.DAT ويحوي نتائج حساب التكلفة السنوية للعازل الحراري وللطاقة الكهربائية والتكلفة الكلية، ومن ثم يمكن تحديد السمك الاقتصادي للعازل عند أقل تكلفة كلية سنويا. ويبين المثال التالي طريقة استخدام برنامج INSUL.FOR وعرض نتائجه.

مثال ١١,١

غرفة تبريد درجة حرارتها –٣٠°م تعمل في موقع له متوسط يومي لدرجات الحرارة الخارجية، ومدى تغير درجات الحرارة يوميا خلال أشهر السنة معطاة كما يلي:

الشهر	١	٢	٣	٤	٥	٦	٧	٨	٩	١٠	١١	١٢
$\bar{T}$	١٠	١٠	٢٢	٢٧	٣٢	٣٧	٤١	٤٢	٤١	٣٣	٢٢	١٠
ΔT	١٠	١٠	١٠	١٥	١٥	١٥	١٣	١٣	٨	١٥	١٥	١٠

افرض البيانات الإضافية الآتية:

أ) العزل الحراري المستخدم هو البوليوريثين وله موصليه حرارية قدرها ٠,٠٢٤ وات /م. °م.

ب) العمر الافتراضي للعازل الحراري هو ٢٠ عامًا.

```
C  PROGRAM TO ANALYIZE THE COST OF INSULATION AND ENERGY FOR
C        A GIVEN  THICKNESS OF AN INSULATION
C
C  KEY TO THE PROGRAM
C
C  COP  = COEFFICIENT OF PERFORMANCE OF REFIGERATION MACHINE
C  CINS = COST OF INSULATION PER UNIT AREA, DOLLARS/SQ.M
C  DOL  = COST OF ELECTRIC ENERGY, DOLLAR/(KW.HR)
C  LIFE = LIFE OF INSULATION IN YEARS
C  MX   = NO. OF THICKNESSES USED IN THE STUDY
C  NDAY = NUMBER OF DAYS IN A MONTH
C  S    = INFILATION RATE, DECIMAL
C  TCON = THERMAL CONDUCTIVITY OF INSULATION, W/(M.C)
C  TR   = TEMPERATURE OF COLD ROOM, C
C  X    = THICKNESS OF INSULATION, M
C
C --------------------------------------------------------------------------------
      DIMENSION TM(12),DT(12),QM(12),NDAY(12)
      OPEN (UNIT=1,FILE='INSUL.IN')
      OPEN (UNIT=2,FILE='INSUL.OUT')
      OPEN (UNIT=3,FILE='INSUL.DAT')

C   SET INPUT DATA
C---------------------------------------------------------------------------------
      TR = -30.
      TCON = 0.024
      LIFE = 20
      S = 0.05
      X = .10
      COP = 1.3
      DO 20 IM = 1,12
 20   READ (1,*) I,NDAY(IM),TM(IM),DT(IM)
      READ (1,*) MX, DOL
C---------------------------------------------------------------------------------
      WRITE (2,900)
      DO 200 J = 1,MX
      READ (1,*) X, CINS
      QY = 0.
      WRITE (2,905) X
      DO 100 I = 1,12
      Q = 0.0
```

شكل ١١,٣ برنامج INSUL بلغة الفورتران لحساب السمك الاقتصادي للعازل الحراري.

```
      DO 60 ITIME = 1,24
      TIME = FLOAT (ITIME)+0.5
      CALL AMB (TM,DT,I,TIME,T)
 60   Q = Q + TCON/X*(T-TR)/1000.
      QM(I) = NDAY(I)*Q
      WRITE (2,910) I,TM(I),DT(I),QM(I)
      QY = QY + NDAY(I)*Q
100   CONTINUE
C-----------------------------------------------------------------------
      WRITE (2,980)
      COSTE = QY/COP*DOL
      COSTI = CINS*S*(1.+S)**LIFE/((1.+S)**LIFE-1.)
      COSTT = COSTE+COSTI
      IF (J .GT. 1) GO TO 150
      COSTIR = CINS
      COSTER = COSTE
      WRITE (3,920) X,QY,COSTE,COSTI,COSTT
150   CONTINUE
      IF (J .EQ. 1) GOTO 200
      PAYYEARS = (CINS-COSTIR)/(COSTER-COSTE)
      WRITE (3,920) X,QY,COSTE,COSTI,COSTT,PAYYEARS
200   CONTINUE
C-----------------------------------------------------------------------
      STOP
900   FORMAT (30X,' PROGRAM INSUL.FOR', //)
905   FORMAT (' INSULATION THICKNESS = ',F5.2,' m',//,
     1   ' MONTH  T   DT    Q  ',//)
910   FORMAT (I4,4(F7.1))
920   FORMAT (6(F8.2))
980   FORMAT (30('--'))
      END
C ***********************************************************************
      SUBROUTINE AMB (TM,DT,I,TIME,T)
C
      DIMENSION TM(12),DT(12)
C
      T = TM(I)+0.5*DT(I)*COS(180.0/12.0*(TIME-15.0))
      RETURN
      END
C ***********************************************************************
```

شكل ١١,٣ تابع.

ج) معدل الغلاء السنوي هو ٥٪.

د) معامل أداء ماكينة التبريد هو ١,٣ كيلـــووات تبريـــد لكـــل كيلـــووات كهرباء.

هــ) تكلفة الكهرباء في موقع بناء غرفة التبريد هو٠,٠٣ دولار / كيلووات – ساعة.

و) تكلفة العازل الحراري لكل متر مربع من مساحة السطح هي:

سمك العزل، م	٠,٠٤	٠,٠٦	٠,٠٨	٠,١٠	٠,١٢	٠,١٤	٠,١٦	٠,١٨	٠,٢٠
التكلفة، دولار/م٢	٥٤,٦	٥٩,٤	٦٤,٢	٦٩,٠	٧٣,٨	٧٨,٦	٨٣,٤	٨٨,٢	٩٣,٠

الحل

يبين جدول ١١,٢ حساب الحمـــل الحراري للأشهر المختلفة من السنة لعازل حراري بسمـــك ٠,٠٤ متر. كما يبين جدول ١١,٣ ملخص حساب التكلفة السنوية الإجمالية لعوازل حرارية بسماكات مختلفة. وكما هو واضح من الجدول، فإن السمك الأمثل اقتصاديا للعازل هو ١٢سم، حيث تكون التكلفة أقل ما يمكن، وهي ٨,٢٤ دولار لكل متر مربع من مساحة سطح الحائط أو السقف. ويبين شكل ١١,٤ البيانات المدخلة للبرنامج عن طريق ملف INSUL.IN، حيث يحتوي الملف على جزئيين من البيانات المدخلة. الأولى عبارة عن ١٢ قيمة، كل سطر يمثل من اليسار إلى اليمين ترتيب الشهور، وعدد أيام الشهر، ودرجة الحرارة المتوسطة والمدى اليومي لدرجات الحرارة. ويمثل الجزء الثاني من البيانات عدد السماكات تحت الدراسة وتكلفة الكهرباء، ثم بعدد السماكات يتم إدخال سماكة العازل وتكلفته لوحدة مساحة.

جدول ١١,٢ حساب الحمل الحراري خلال الأشهر المختلفة باستخدام عازل حراري سمكه ٠,٠٤ متر لمثال ١١,١.

الشهر	الحمل الحراري كيلووات - ساعة/م٢	الشهر	الحمل الحراري كيلووات - ساعة/م٢	الشهر	الحمل الحراري كيلووات - ساعة/م٢
١	١٧,٨	٥	٢٧,٧	٩	٣٠,٧
٢	١٦,١	٦	٢٨,٩	١٠	٢٨,١
٣	٢٣,٢	٧	٣١,٧	١١	٢٢,٤
٤	٢٤,٦	٨	٣٢,١	١٢	١٧,٨

ويبين شكل ١١,٥ نتائج حساب التكلفة كما هي معطاة في ملف INSUL.DAT حيث تمثل الأعمدة من الشمال إلى اليمين على التوالي الآتـــي: سمك العزل الحراري (م) والحمل الحراري السنوي خلال العازل (كيلووات/م٢)، والتكلفة السنوية الكلية للعازل، والطاقة الكهربائية (دولار/م٢)، والتكلفة السنوية للطاقة الكهربائية اللازمة لإزالة الحمل الحراري المنتقل خلال العازل الحراري (دولار/م٢)، وعدد السنوات التي يسترجع بها الزيادة في تكلفة العازل الحراري فوق ٤ سم عن طريق التوفير السنوي في استهلاك الكهرباء. ويلاحظ من النتائج في شكل ١١,٥ أنه يمكن استرداد تكلفة زيادة سمك العازل من ٤ سم إلى ١٢ سم في ٤,١٤ سنة تقريبا. ويبين شكل ١١,٦ تغير التكلفة السنوية للعازل الحراري مع سمك العازل.

١١,٦ القيم الموصى بها لسمك العزل الحراري

في كثير من الأحيان يرغب المهندسون في استخدام طريقة بسيطة وسريعة لتحديد سمك العازل الحراري. ونظرًا لأن العمليات الحسابية السابقة لتحديد السمك الأمثل بها كثير من المدخلات والمتغيرات، مثل تكلفة العازل

المستخدم، وعمره الافتراضي، ومعدل الغلاء السنوي، وسعر الطاقة الكهربائية في موقع بناء غرفة التبريد، وكذلك معرفة معامل أداء ماكينة التبريد المستخدمة، عندئذ يلجأ مهندسو التصميم إلى استخدام القيم التقريبية المتعارف عليها هندسيا لسمك العازل الحراري. ولقد أوصت الجمعية الأمريكية لمهندسي التدفئة والتبريد وتكييف الهواء بأن تكون المقاومة الحرارية للعازل الحراري المستخدم كما هو معطى بجدول ١١,٤(ASHRAE 1994). عندئذ يحسب سمك العازل الحراري كما يلي:

جدول ١١,٣ ملخص نتائج مثال ١١,١.

سمك العازل x م	الحمل الحراري السنوي خلال العازل Q_y/A كيلووات ساعة /م٢	التكلفة السنوية: طاقة كهربائية دولار / م٢	العازل دولار / م٢	إجمالي دولار / م٢	عدد السنوات لاسترجاع الزيادة في تكلفة العازل
٠,٠٤	٣٠١,٢١	٦,٩٥	٤,٣٨	١١,٢٣	
٠,٠٦	٢٠٠,٨١	٤,٦٣	٤,٧٧	٩,٤٠	٢,٠٧
٠,٠٨	١٥٠,٦١	٣,٤٨	٥,١٥	٨,٦٣	٢,٧٦
٠,١	١٢٠,٤٩	٢,٧٨	٥,٥٤	٨,٣٢	٣,٤٥
٠,١٢	١٠٠,٤٠	٢,٣٢	٥,٩٢	٨,٢٤	٤,١٤
٠,١٤	٨٦,٠٦	١,٩٩	٦,٣١	٨,٢٩	٤,٨٣
٠,١٦	٧٥,٣٠	١,٧٤	٦,٦٩	٨,٤٣	٥,٥٢
٠,١٨	٦٦,٩٤	١,٥٤	٧,٠٨	٨,٦٢	٦,٢١
٠,٢٠	٦٠,٢٤	١,٣٩	٧,٤٦	٨,٨٥	٦,٩١

1	31	10.0	10.0
2	28	10.0	10.0
3	31	22.0	10.0
4	30	27.0	15.0
5	31	32.0	15.0
6	30	37.0	15.0
7	31	41.0	13.0
8	31	42.0	13.0
9	30	41.0	08.0
10	31	33.0	15.0
11	30	22.0	15.0
12	31	10.0	10.0

9	0.03

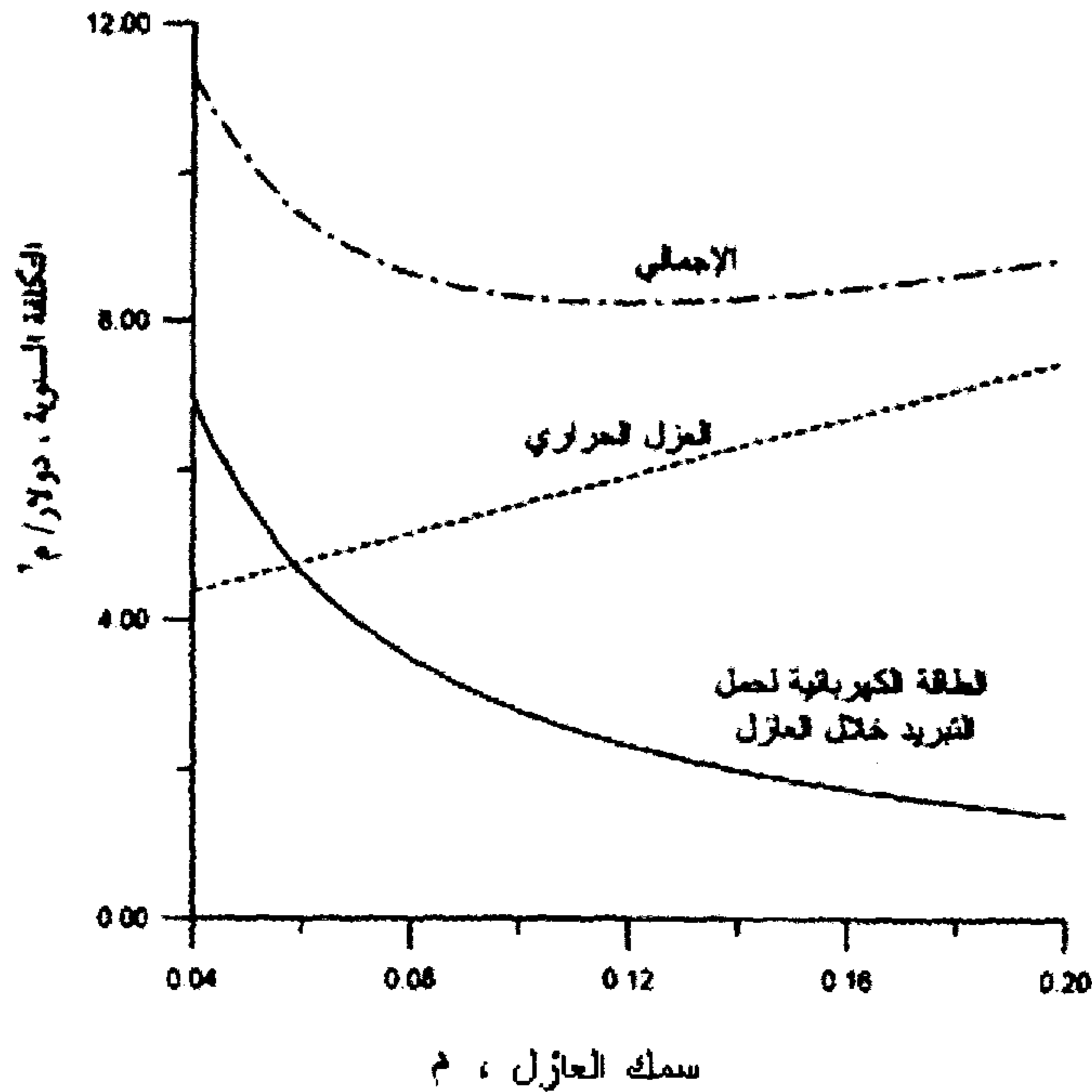
0.04	54.6
0.06	59.4
0.08	64.2
0.10	69.0
0.12	73.8
0.14	78.6
0.16	83.4
0.18	88.2
0.2	93.

شكل ١١,٤ بيانات الملف INSUL.IN الذي يحوي معطيات مثال١١,١.

.04	301.21	6.95	4.38	11.33	
.06	200.81	4.63	4.77	9.40	2.07
.08	150.61	3.48	5.15	8.63	2.76
.10	120.49	2.78	5.54	8.32	3.45
.12	100.40	2.32	5.92	8.24	4.14
.14	86.06	1.99	6.31	8.29	4.83
.16	75.30	1.74	6.69	8.43	5.52
.18	66.94	1.54	7.08	8.62	6.21
.20	60.24	1.39	7.46	8.85	6.91

شكل ١١,٥ بيانات الملف INSUL.DAT الذي يحوي ملخص حسب التكلفة السنوية لمثال١١,١.

البيانات من اليسار إلى اليمين: سمك العازل (م)، الطاقة السنوية (كيلووات/م^2)، تكلفة الكهرباء، تكلفة العازل، التكلفة الكلية، عدد السنوات لاسترجاع التكلفة.



شكل ١١,٦ تغير التكلفة السنوية للعازل الحراري، والتكلفة السنوية للطاقة الكهربائية للحمل الحراري خلال العلم، والتكلفة السنوية الإجمالية مع سمك العازل.

$$x_i = R_i k_i \qquad (11.12)$$

حيث R_i هي المقاومة الحرارية للعازل و k_i هي الموصلية الحرارية له. ويلاحظ أن جدول ١١,٤ يعطي مدى لاختيار قيمة R وليس قيمة واحدة، وذلك نظرًا لاختلاف تكلفة الطاقة من بلد إلى آخر ومن سنة إلى أخرى. فإذا كانت تكلفة الطاقة الكهربائية منخفضة نسبيًا، أخذت قيمة R_i في بداية المدى الموصى به، أما إذا كانت قيمة الكهرباء مرتفعة نسبيا، أخذت قيمة R_i في نهاية المدى الموصى به.

جدول ١١,٤ القيمة الموصى بها للمقاومة الحرارية للعازل الحراري المستخدم في غرف التبريد (ASHRAE 1994).

درجة حرارة غرفة التبريد °م	المقاومة الحرارية ، م٢ . °م / وات		
	أرضية	حوائط وأسقف معلقة	أسقف
٤ إلى -١	-	٤,٤	٥,٣ إلى ٦,٢
-٤ إلى -٢٠	٣,٥	٤,٢ إلى ٥,٦	٦,٢ إلى ٧,٠
-٢٣ إلى -٢٩	٤,٨ إلى ٥,٦	٦,٢ إلى ٧,٠	٧,٩ إلى ٨,٢
-٤٠ إلى -٤٦	٥,٣ إلى ٧,٠	٧,٩ إلى ٨,٨	٨,٨ إلى ١٠,٦

مثال ١١,٢

احسب السمك الاقتصادي للعازل الحراري بمثال ١١,١ عندما تكون تكلفة الطاقة الكهربائية هي ٠,٠٣ ، و ٠,٠٤ ، و ٠,٠٥ دولار/ كيلووات – ساعة، قارن الحسابات مع القيمة الموصى بها في جدول ١١,٤.

الحل

يستخدم برنامج INSUL لحساب السمك الاقتصادي للعازل عند التكلفة المعطاة عالية للطاقة الكهربائية. ويبين جدول ١١,٥ النتائج التي أعطاها البرنامج. ويلاحظ من النتائج زيادة السمك الاقتصادي العازل من ٠,١٢م إلى ٠,١٤م بزيادة تكلفة الطاقة الكهربائية من ٠,٠٣ إلى ٠,٠٤ دولار / كيلووات– ساعة. ثم زيادة السمك الاقتصادي إلى ٠,١٦م إذا زادت تكلفة الكهرباء إلى ٠,٠٥ دولار / كيلووات – ساعة. ويبين شكل ١١,٧ تغير التكلفة السنوية للعازل الحراري وللطاقة الكهربائية اللازمة لإزالة الحمل الحراري المنتقل خلاله، مع سمك العازل عند القيم الثلاثة المعطاة لتكلفة الطاقة الكهربائية.

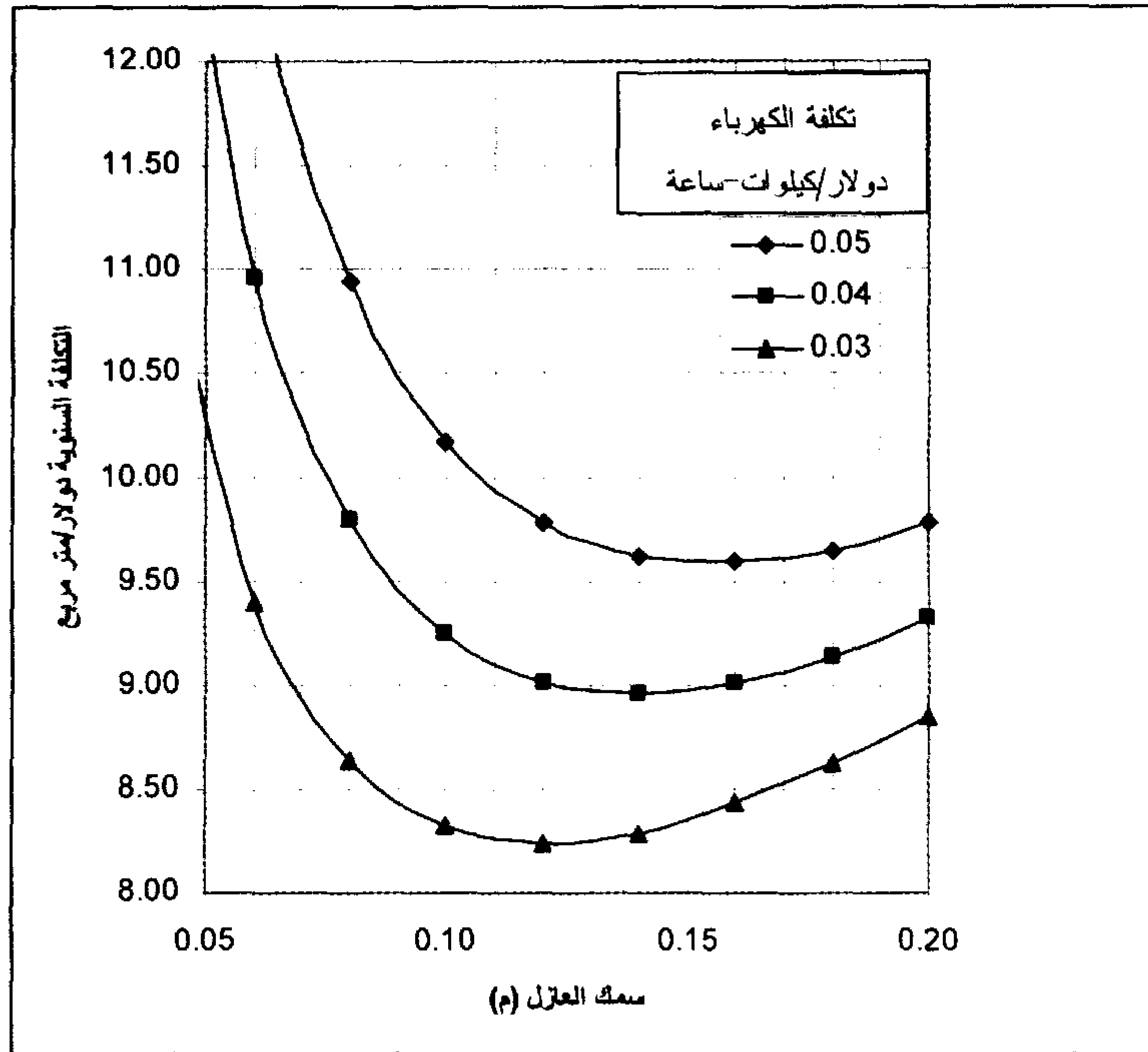
وبالرجوع إلى جدول ١١,٤ نجد أن القيمة الموصى بها للمقاومة الحرارية للحوائط المستخدمة في غرف تبريد عند -٣٠°م، تتراوح بين ٦,٢ إلى ٧,٠ م٢.°م/ وات. وبفرض قيمة R_i في منتصف هذا المدى، أي ٦,٦ م٢ .°م/ وات، فإن سمك العازل الموصى به يكون

$$x_i = 6.6 \times 0.024 = 0.16\text{m}$$

وهي قيمة تناظر القيمة التي حصلنا عليها من برنامج INSUL عندما تكون تكلفة الطاقة ٠,٠٥ دولار/كيلووات - ساعة.

جدول ١١,٥ نتائج برنامج INSUL لحساب السمك الاقتصادي في مثال ١١,٢.

سمك العازل	التكلفة السنوية الكلية لأسعار مختلفة من الطاقة الكهربائية ، (دولار /م٢)		
م	٠,٠٣	٠,٠٤	٠,٠٥
٠,٤	١١,٣٠	١٣,٦٥	١٥,٩٤
٠,٦	٩,٤٠	١٠,٩٥	١٢,٤٩
٠,٠٨	٨,٦٣	٩,٧٩	١٠,٩٤
٠,١٠	٨,٣٢	٩,٢٤	١٠,١٧
٠,١٢	٨,٢٤	٩,٠١	٩,٧٨
٠,١٤	٨,٢٩	٨,٩٦	٩,٦٢
٠,١٦	٨,٤٣	٩,٠١	٩,٥٩
٠,١٨	٨,٦٢	٩,١٤	٩,٦٥
٠,٢٠	٨,٨٥	٩,٣٢	٩,٧٨
النتيجـــة النهائيـــة			
تكلفة الكهرباء، دولار/كيلووات - ساعة	٠,٠٣	٠,٠٤	٠,٠٥
السمك الاقتصادي للعازل، م	٠,١٢	٠,١٤	٠,١٦



شكل ١١,٧ تغير التكلفة الإجمالية السنوية للعازل الحراري مع سمك العازل عند أسعار مختلفة للطاقة الكهربائية.

١١,٧ حاجز انتقال بخار الماء

ينتقل بخار الماء إلى غرف التبريد بطريقين: مع الهواء الخارجي المتسرب إلى غرفة التبريد، وبالانتشار نتيجة اختلاف الضغط الجزئي لبخار الماء بالهواء خارج غرفة التبريد وداخلها. وبدخول بخار الماء إلى غرفة التبريد يتكثف هذا البخار إلى ماء متى ما قلّت درجة حرارته عن درجة حرارة نقطة الندى بالهواء الحامل لهذا البخار. ويعمل الماء الناتج عن التكثيف على إتلاف العازل الحراري، أو إتلاف دهان الأسطح الداخلية أو الخارجية للحوائط والسقف. أيضا، يتجمد الماء المكثف بغرفة التبريد في الأماكن التي تقل بها درجة الحرارة عن درجة التجمد للماء ، مثل الأسطح الداخلية لغرفة التبريد

وعلى ملف التبريد، وتعرف هذه الظاهرة بالصقيع. ويعيق الصقيع المتكون بملف التبريد عملية تبريد الغرفة، مما يستلزم وجودة دورة خاصة لإذابة الصقيع بغرف التبريد التي تعمل عند درجات حرارة أقل من درجة التجمد للماء. وبالطبع تزيد دورة إذابة الصقيع حمل التبريد لغرفة التبريد، وكذلك تزيد من استهلاك الطاقة اللازمة للتشغيل بالإضافة إلى زيادة التكلفة الأولية للمعدات.

تصمم غرف التبريد مع مراعاة الحد من انتقال بخار الماء إليها. ويتم ذلك بطريقتين: أولا سد جميع الشقوق والفتحات التي تؤدي إلى تسرب الهواء الخارجي إلى غرفة التبريد، وثانيا وضع حاجز لمنع بخار الماء من الانتقال إلى الغرفة بالانتشار. ويعرف هذا الحاجز بأنه مادة تمنع انتقال بخار الماء خلالها. وتستخدم صفائح الصلب كحاجز لتسرب بخار الماء في غرف التبريد، ويلزم عندئذ لحام أطراف الصفائح مع بعضها البعض بدقة لمنع تسرب بخار الماء خلال الفراغات بين هذه الصفائح. أيضا تستخدم رقائق الألمنيوم المعروفة تجاريًا باسم الألمنيوم فويل (aluminum foil) كحاجز تسرب. وفي هذه الحالة يلزم تركيب أطراف رقائق الألمنيوم أحدها فوق الآخر، مع تركيب شريط لاصق فوق هذه الوصلات. أيضا، يستخدم البلاستيك كحاجز لبخار الماء في العديد من غرف التبريد.

يعتمد اختيار مكان تركيب حاجز بخار الماء على قيمة درجة حرارة غرفة التبريد ودرجة حرارة الجو الخارجي. والقاعدة العامة لتركيب حاجز البخار هي أن يوضع حاجز بخار الماء على الجهة الأسخن من الحائط نظرًا لأن الهواء الساخن يستطيع حمل معه عادة قدرًا من بخار الماء أكبر مما يحمله الهواء البارد، مما يعني تسرب بخار الماء من الهواء الساخن إلى الهواء البارد. فمثلا إذا كانت درجة حرارة غرفة التبريد تقل دائما عن درجة حرارة الجو

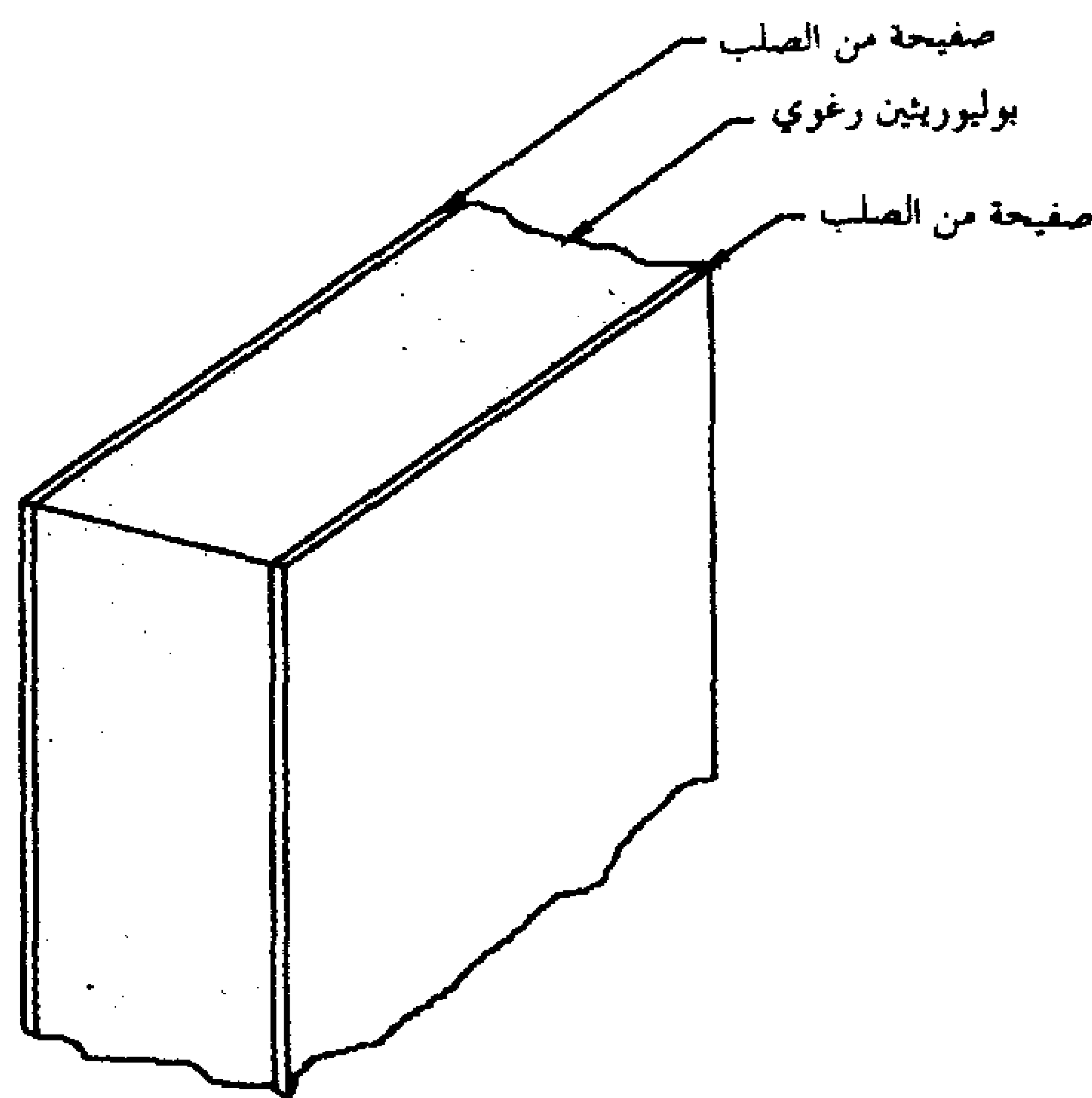
الخارجي على مدار العام، وضع حاجز بخار الماء على السطح الخارجي للحائط أو السقف لغرفة التبريد. أما إذا كانت درجة الحرارة الخارجية تقل في بعض الأحيان (شتاء أو ليلا) عن درجة حرارة غرفة التبريد، فإنه يلزم عندئذ تركيب حاجز بخار الماء على السطحين الداخلي والخارجي لحوائط وسقف غرفة التبريد.

برغم العناية الفائقة التي يبذلها مصممو غرفة التبريد في اختيار حاجز البخار ومكان تركيبه وتوصيف الطرق الفنية اللازمة لضمان عدم تسرب بخار الماء بين الوصلات المختلفة بين أسطح حاجز بخار الماء، إلا أن هناك عوامل عدة تؤدي إلى إتلاف حاجز بخار الماء. تأتي بعض هذه العوامل أثناء إنشاء غرف التبريد نفسها ويأتي البعض الآخر أثناء فترات التشغيل. وتتلخص أهم هذه العوامل في الآتي: استخدام المسامير المختلفة أو الدبابيس التي تخترق حاجز بخار الماء بغرض تثبيت بعض المكونات أو الدعائم، وجهل عمال الإنشاء بوظيفة وأداء حاجز بخار الماء، والحوادث العارضة التي قد توجد أثناء عملية تركيب حاجز البخار أو نتيجة تصادم بعض معدات نقل المواد المخزنة مع حاجز بخار الماء أثناء تشغيل هذه المعدات. لذا يلزم توعية جميع عمال الإنشاء بأهمية عدم اختراق حاجز بخار الماء وضرورة إحكام سد أي فتحة في حاجز بخار الماء. أيضا يلزم تركيب معدات أسفل الحوائط الداخلية لغرف التبريد للحيلولة دون تصادم معدات نقل البضائع مع الحوائط.

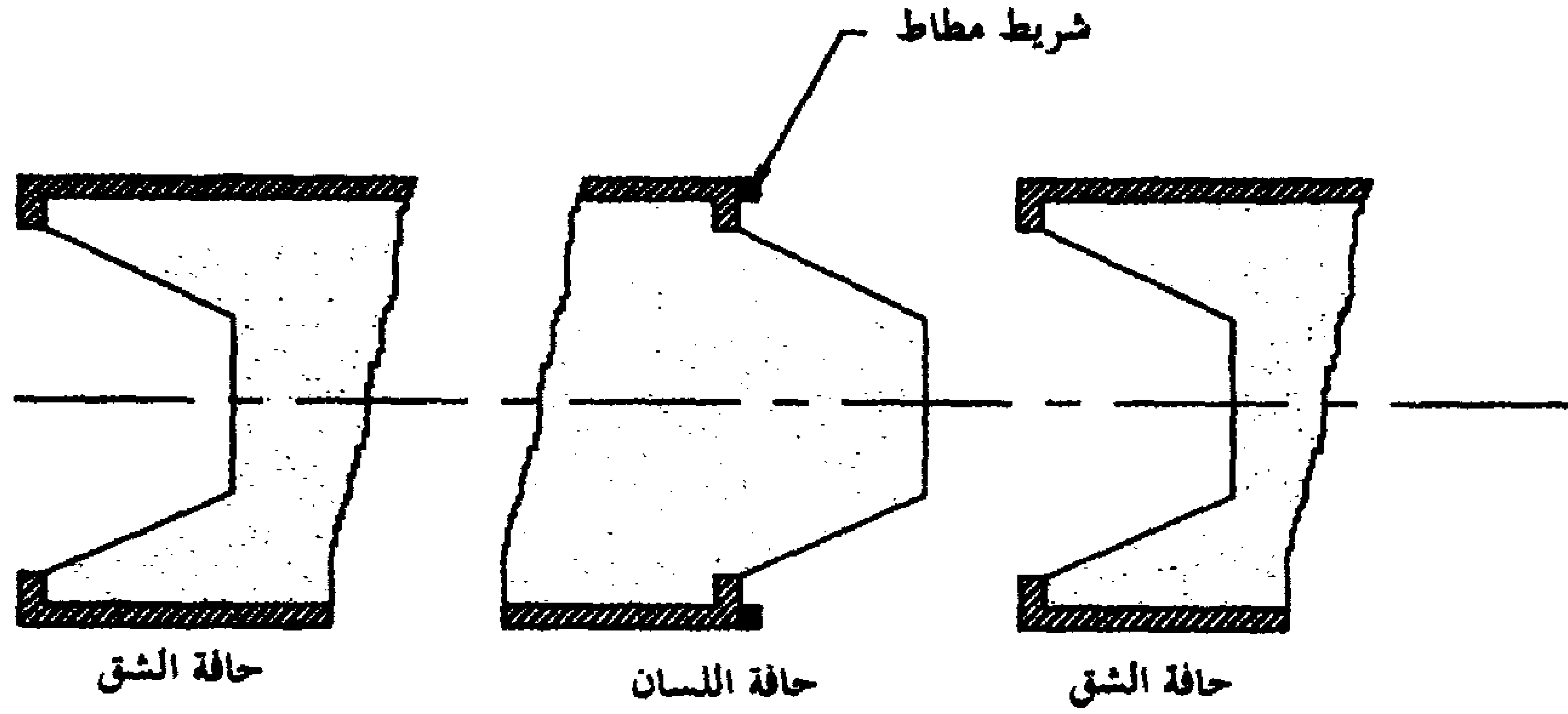
١١,٨ ألواح العزل الحراري سابقة التصنيع

تقوم عدة شركات بتصنيع ألواح عزل حراري بمصانعها بمقاسات مختلفة من حيث الطول والعرض وسمك العازل الموجود بها ونوع الأسطح الخارجية لها. ويبين شكل ١١,٨ مقطعًا في أحد هذه الألواح. وتصنع هذه الألواح العازلة

عادة من البوليوريثين الرغوي المحفوظ بين لوحين من الصلب أو الصلب المقاوم للصدأ أو الحديد المجلفن، مما يعطى هذه الألواح صلابة جيدة. وتمتاز هذه الألواح بثبات سمك العزل الحراري بها وبحجزها لبخار الماء. وتصنع هذه الألواح بمواصفات خاصة ومقاسات متنوعة تسمح بتركيبها معا لبناء الحوائط والأسقف والأرضيات بغرف التبريد، وتثبت هذه الألواح بما يعرف بحافتي اللسان والشق، بالإضافة إلى قفل تثبيت. لذا تصنع هذه الألواح بحيث تشكل إحدى حافتيها على شكل لسان، بينما تشكل الحافة الأخرى على شكل شق، كما هو مبين بشكل ١١,٩ [Al-Hasawi]. وعند توصيل لوحين معا، ينزلق اللسان في الشق. ولضمان عدم تسرب الهواء أو بخار الماء بين حافتي اللوحين يوضع شريط مطاطي بين اللوحين في بعض التصميمات أو يسمح بأن يزيد طول اللسان قليلا عن عمق الشق في تصميمات أخرى، كما يستخدم قفل تثبيت (انظر شكل ١١,١٠) لضم اللوحين معا مما يعطى توصيلا ثابتا وقويا [Al-Hasawi].

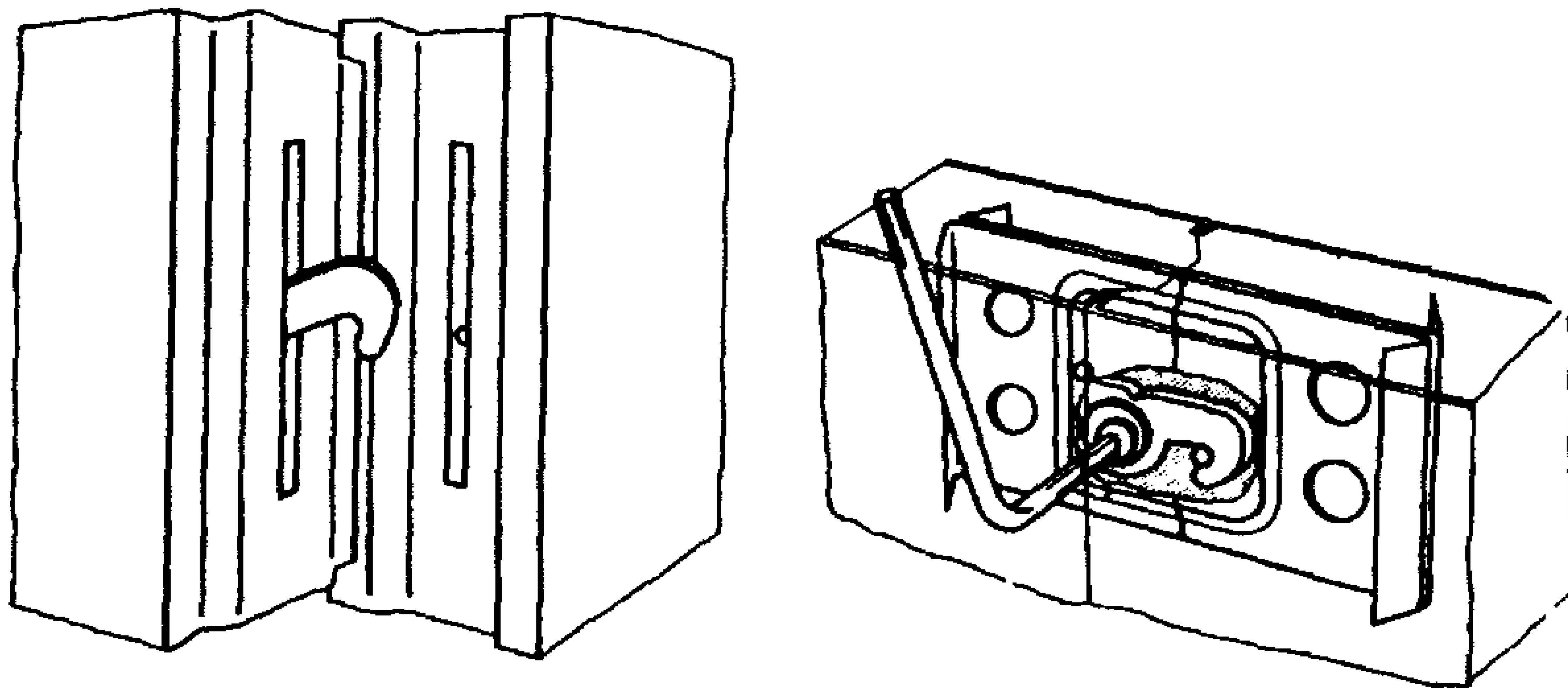


شكل ١١,٨ مقطع في لوح عازل سابق التصنيع.



شكل ١١,٩ حافتي اللسان والشق للألواح العازلة سابق التصنيع [Al-Hasawi].

ويتوفر تشطيب الأسطح الداخلية والخارجية لألواح العزل الحراري باختيارات عدة. توجد من هذه الألواح ما هو مكسو بطبقة من البلانيل الأبيض الذي يحافظ على نظافة هذه الأسطح ومظهره، ومنها ما هو مكسو بالأنيميل الأبيض بالإضافة إلى بعض الأنواع المطلية.



شكل ١١,١٠ رسم تخطيطي يوضح توصيل لوحين معا بقفل تثبيت [Al-Hasawi].

الرموز ومعانيها للفصل الحادي عشر

A المساحة [م٢]

C_e التكلفة الكهربائية [دولار/م٢]

C_i التكلفة السنوية للعازل [دولار/م٢]

COP معامل أداء دورة التبريد

C_t التكلفة الكلية $C_t=C_i+C_e$ [دولار/م٢]

F تكلفة الطاقة الكهربائية [دولار/كيلووات-ساعة]

I التكلفة الأولية للعازل [دولار]

I_{ref} التكلفة الأولية الإسنادية [دولار]

k معامل الموصلية الحرارية [وات/(م.كلفن)]

n العمر الافتراضي للعزل الحراري [سنة]

N_j عدد الأيام في الشهر [يوم]

Q الطاقة المنتقلة إلى غرفة التبريد [كيلو وات-ساعة]

$\dot{Q}$ معدل سريان الحرارة [وات أو كيلووات]

Q_y إجمالي الطاقة السنوية المنتقلة إلى غرفة التبريد [كيلو وات – ساعة]

s المعدل السنوي للغلاء

t الزمن [ساعة]

$\overline{T}$ متوسط درجة الحرارة الخارجية [°م]

T_i درجة الحرارة الخارجية [°م]

T_R درجة حرارة غرفة التبريد [°م]

U المعامل الكلي لانتقال الحرارة [وات/م٢.°م]

W_e الطاقة الكهربائية لتشغيل وحدات التبريد [كيلووات – ساعة]

x سمك العازل [م]

Y عدد السنوات لكي تسترد الزيادة في تكلفة العازل عن السمك المرجعي

الحروف الإغريقية

ΔT فرق درجات الحرارة [°م]

الفصل الثاني عشر
نظم إذابة الصقيع

١٢,١ مقدمة

تعاني غرف التبريد التي تعمل عند درجات حرارة تحت الصفر المئوي من تكون صقيع أو جليد على أسطح ملفات التبريد بها. وينشأ هذا الصقيع نتيجة تكثف بخار الماء الموجود بالهواء المار على ملف التبريد، ومن ثم تجمد هذا الماء فور ملامسته لسطح الملف الذي له درجة حرارة تحت درجة الصفر المئوي. وكلما زاد مقدار بخار الماء بهواء غرفة التبريد كلما زاد مقدار الصقيع المتكون على سطح ملف التبريد. ومن أهم مصادر بخار الماء بغرف التبريد: الهواء الرطب المتسرب من خارج غرفة التبريد إلى داخلها، وبخار الماء المتسرب (دون الهواء) من خارج غرفة التبريد إلى داخلها. ففي الحالة الأولى يتسرب الهواء الخارجي إلى داخل غرفة التبريد من خلال باب الغرفة عند فتح هذا الباب، أو خلال أي فتحات أو شقوق قد توجد بجدران أو سقف الغرفة، أو من خلال باب الغرفة أثناء غلقه إذا لم يكن محكم الغلق. أما في الحالة الثانية، فيتسرب بخار الماء من خارج الغرفة إلى داخلها من خلال جدران أو أرضية أو سقف غرفة التبريد، بما يعرف بظاهرة الانتشار (راجع الفصل الحادي عشر). فمن المعروف نفاذ بخار الماء خلال الأسطح الصلبة إذا كان هناك فرق في الضغط الجزئي لبخار الماء بين سطحي هذه المادة. فمثلاً، قد يتسرب بخار الماء إلى غرف التبريد خلال أحد جدرانها المبنية من الطوب، أو الأسمنت أو الخشب نتيجة وجود فرق في الضغط الجزئي لبخار الماء بين الهواء خارج وداخل الغرفة. ويعتمد مقدار تسرب بخار الماء خلال الجدار (أو السقف أو الأرضية) على نفاذية المادة أو المواد المصنع منها الجدار. لهذا السبب يجب أن يوضع

حاجز لبخار الماء (وهى مادة لها نفاذية بخار متدنية) على جميع جدران وأسطح وأرضية غرف التبريد. ويجب مراعاة الشروط الهندسية اللازمة لتركيب حاجز البخار على الأسطح المختلفة لغرف التبريد (انظر الفصل الحادي عشر).

يسبب وجود الصقيع على سطح ملف التبريد عدة مشاكل، أهمها زيادة المقاومة الحرارية بين سطح الملف والهواء المار خلاله، وتقليل المساحة المتاحة لسريان الهواء خلال الملف. وتؤدي هاتين المشكلتين إلى خفض سعة التبريد للملف، كما تؤدي المشكلة الثانية إلى خفض رمية الهواء من ملف التبريد، مما يكون له أكبر الضرر على توزيع الهواء بغرفة التبريد، وبالتالي احتمال ارتفاع درجة الحرارة في بعض أجزاء الغرفة التي قد لا يصلها قدر كاف من الهواء القادم من ملف التبريد. وبزيادة سمك طبقة الصقيع المتكونة على ملف التبريد يقل تدريجيًا كل من سعة التبريد ومعدل سريان الهواء خلال الملف، وقد يصل كليهما إلى صفر أي تنعدم سعة التبريد كليًا عندما يعمل الصقيع على سد مساحة سريان الهواء كليًا خلال ملف التبريد.

ونتيجة للمشاكل التي يسببها وجود الصقيع على ملف التبريد كان لابد من العمل على إذابة هذه الصقيع على فترات زمنية للحد من تراكمه إلى الدرجة التي تعوق عمل نظام التبريد. وهناك عدة طرق لإذابة الصقيع تشترك جميعها في توفير مصدر حراري لإذابة الصقيع على فترات. وتعتمد الفترة الزمنية بين دورات إذابة الصقيع على نوع ملف التبريد المستخدم، وظروف التشغيل من حيث درجة حرارة غرفة التبريد ومواصفات بنائها وحالة الهواء الخارجي. فمثلاً، قد يحتاج ملف التبريد المكون من مواسير عارية إلى إذابة الصقيع به مرة واحدة شهريًا، بينما يحتاج ملف التبريد المكون من أنابيب وزعانف ومروحة لدفع الهواء خلاله إلى إذابة الصقيع به مرة كل ساعة أو ساعتين تبعًا لظروف التشغيل. أيضًا، يعتمد طول فترة إذابة الصقيع بكل دورة من دورات إذابة

الصقيع على الطريقة المستخدمة في إذابة الصقيع، ومقدار الطاقة الحرارية المستخدمة لإذابة الصقيع، وقبل كل شيء على سمك طبقة الصقيع المتكونة على سطح ملف التبريد.

١٢,٢ طرق إذابة الصقيع

هناك عدة طرق لإذابة الصقيع أهمها الطرق الآتية:

- استخدام هواء من مصدر خارجي.
- استخدام ماء دافئ أو محلول ملحي دافئ.
- استخدام سخان كهربائي.
- استخدام غاز ساخن من الضاغط مباشرة إلى المبخر.

تعتبر الطريقة الأولى هي أقل الطرق شيوعًا لإذابة الصقيع. ففي هذه الطريقة توقف دورة التبريد (بإيقاف الضاغط) يدويًا أو أوتوماتيًا ثم يسمح بتمرير هواء خارجي على ملف التبريد لفترة زمنية مما يساعد على إذابة الصقيع. ويمرر هذا الهواء قسرا باستخدام مروحة، أو بالحمل الطبيعي. ولقد استخدمت هذه الطريقة في النظم القديمة لمخازن حفظ الأغذية. وتحتاج هذه الطريقة لوقت طويل نسبيًا. بالمقارنة بالطرق الأخرى، لإذابة الصقيع مما حد من استخدامها حاليًا.

يستخدم الماء الدافئ أو محلول الماء الملحي الدافئ في بعض التطبيقات لإذابة الصقيع. ولقد استخدمت هذه الطريقة بكثرة في الماضي. إلا إن الصناعات الحديثة لم تعد تفضلها كطريقة جيدة لإذابة الصقيع، وتعتبر الطريقتان الثالثة والرابعة هما أكثر الطرق شيوعًا نظرًا لقصر الفترة الزمنية لإذابة الصقيع بهاتين الطريقتين.

في طريقة التسخين الكهربائي، يوضع عنصر تسخين كهربائي ملامس مباشرة لسطح ملف التبريد أو لسطح زعانف ملف التبريد. وعند بدء دورة إذابة الصقيع، سواءً يدويًا أو أوتوماتيًا، توقف دورة التبريد، ويبدأ العنصر الكهربائي في التسخين، مما يذيب الصقيع. وتمتاز هذه الطريقة بالإضافة إلى سرعتها وكفاءتها، بسهولة تشغيلها وصيانتها وانخفاض تكلفتها الأولية، إلا أن أهم عيوبها استخدام طاقة كهربائية لإذابة الصقيع، مما يعتبر غير اقتصادي من وجهة نظر استهلاك الطاقة. ويستخدم التسخين الكهربائي بكثرة في العديد من الثلاجات والمجمدات المنزلية ووحدات التبريد الصغير نسبيًا.

وتعتبر طريقة استخدام الغاز الساخن هي أكثر الطرق شيوعًا على الإطلاق، خاصة في وحدات التبريد الكبيرة نسبيًا. ففي هذه الطريقة، يستمر الضاغط في العمل أثناء دورة إذابة الصقيع دون توقف، حيث يمد ملف التبريد (المبخر) بالغاز الساخن الذي يعمل على إذابة الصقيع. ويبين شكل ١٢,١ رسمًا تخطيطيًا للفكرة الأساسية لهذه الطريقة. فكما هو مبين بالشكل، يفتح صمام الملف اللولبي لتوصيل خط الغاز الساخن بالمبخر، فيعمل هذا الغاز على إذابة الصقيع المتكون على سطح المبخر.

١٢,٣ استخدام الغاز الساخن لإذابة الصقيع

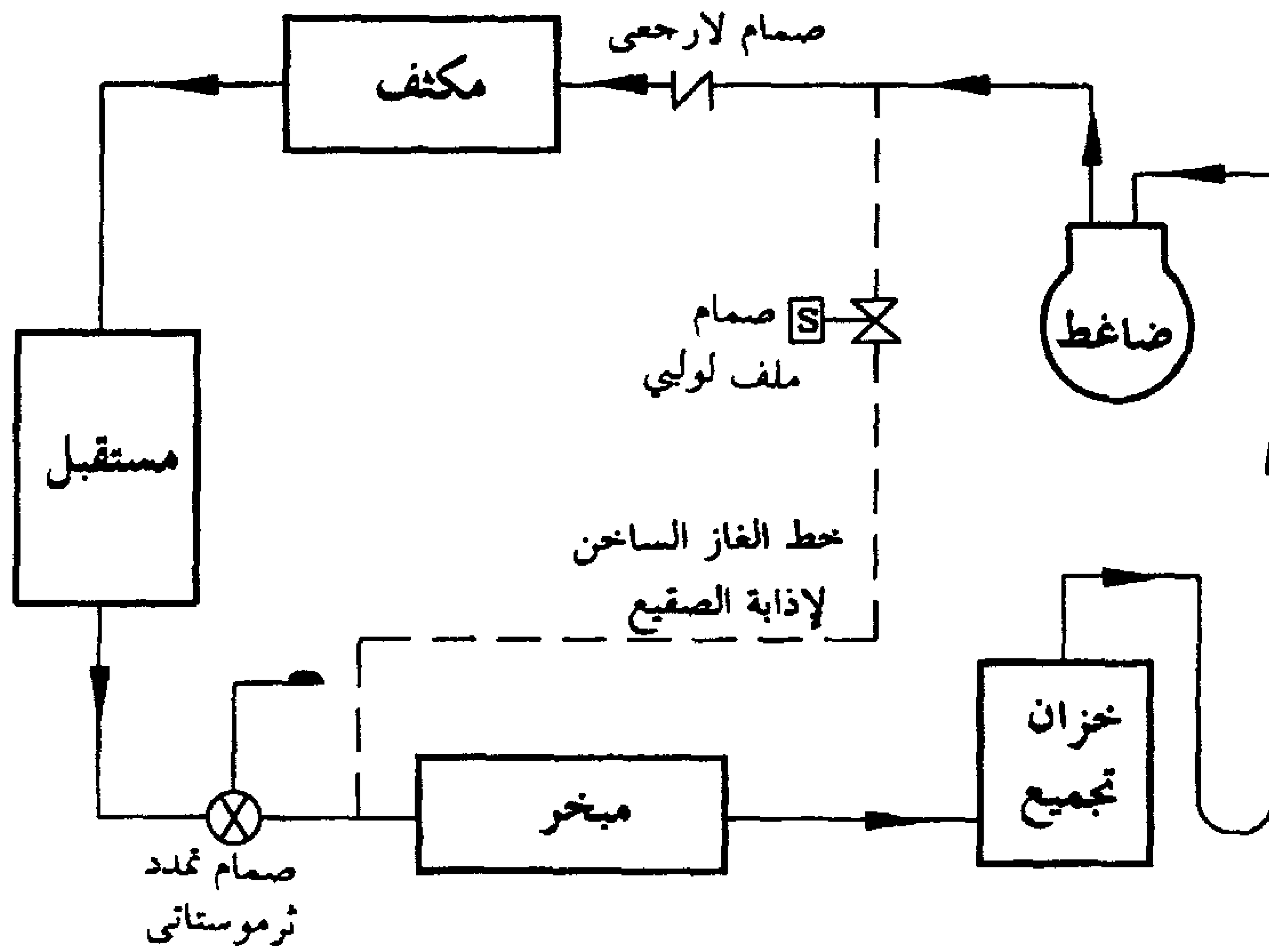
بينا في الجزء السابق الفكرة الأساسية لاستخدام الغاز الساخن لإذابة الصقيع المتراكم على المبخر. والدورة المبينة لهذا الغرض بشكل ١٢,١ لا يمكنها العمل فعليًا لعدم وجود حمل حراري يمد الضاغط ببخار المبرد، مما يعني توقف الضاغط بعد فترة زمنية قصيرة فور ضخ بخار المبرد المتجمع في خزان التجميع. لذا تستخدم هذه الدورة فقط عندما يضم نظام التبريد مبخرين أو أكثر، وضاغط واحد، عندئذ يتم إذابة الصقيع بمبخر واحد فقط من هذه

المبخرات، بينما تمد باقي مبخرات النظام بالحمل الحراري اللازم لاستمرار عمل الضاغط. ويبين شكل ١٢,٢ دورة غاز ساخن لنظام تبريد يحوي ثلاثة مبخرات. ويبين الشكل حالة تشغيل النظام لإذابة صقيع المبخر ١، بينما يعمل المبخران ٢ و٣ في دورة التبريد المعتادة لإمداد الضاغط ببخار المبرد اللازم لعمله. في هذه الحالة، يسري الغاز الساخن خلال صمام الملف اللولبي إلى المبخر لإذابة الصقيع، ثم يخرج سائل المبرد إلى خط السائل خلال خط تجنيبي يحوي صمامًا لا رجعيًا (انظر الشكل).

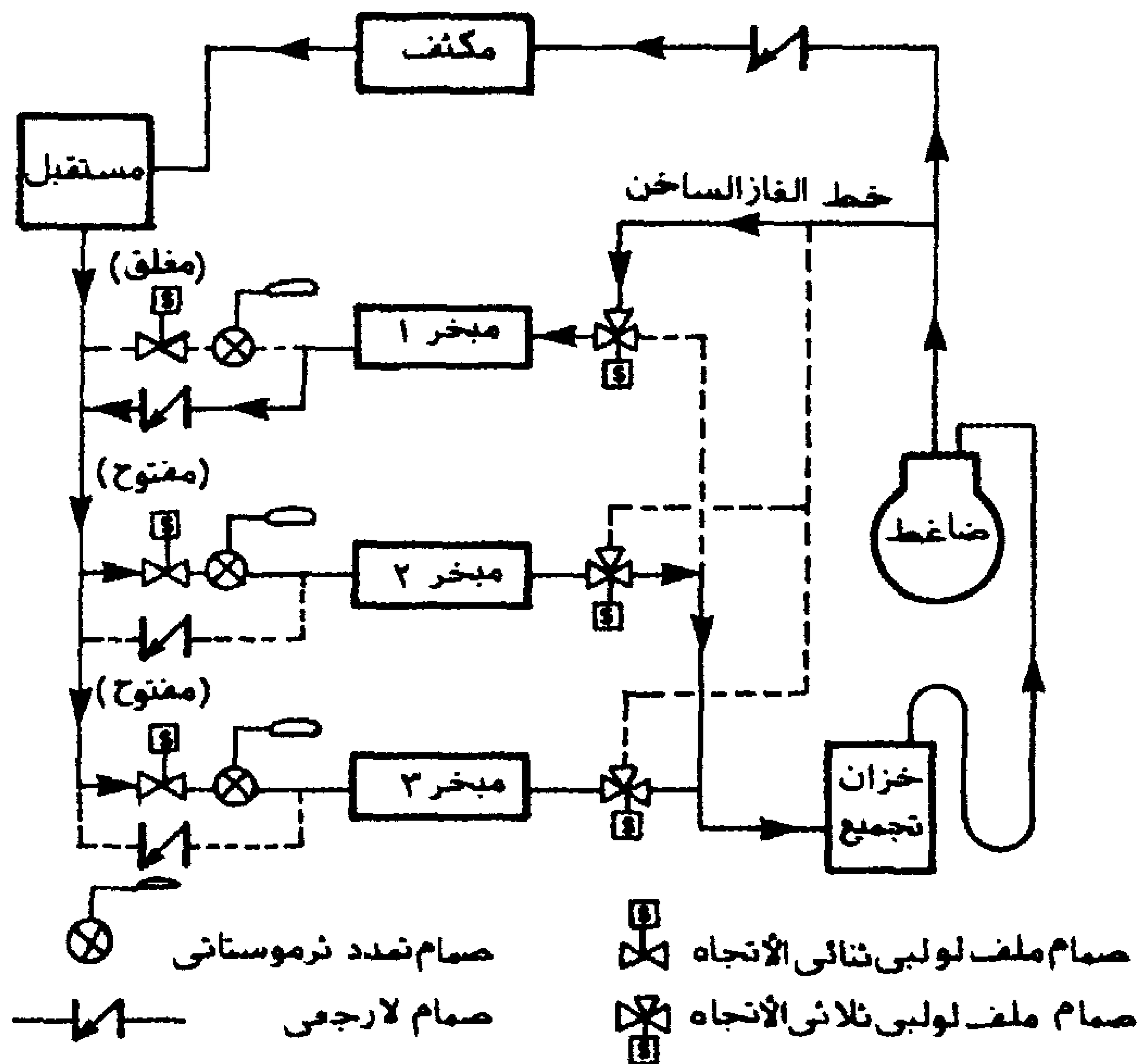
وهناك بعض الحلول الهندسية التي تتبع عادة لاستخدام دورة الغاز الساخن لإذابة الصقيع بنظم المبخر الواحد. وتعمل كل هذه الحلول على توفير حمل حراري لنظام التبريد – أثناء دورة إذابة الصقيع – لإمداد الضاغط ببخار المبرد اللازم لتشغيله. ومن أهم الطرق المتبعة لهذا الآتي:

- استخدام دورة مضخة حرارية (دورة تبريد معكوسة).
- استخدام تخزين حراري (بنك حراري).
- استخدام مصدر حراري مساعد.
- استخدام مبخر مساعد.

يبين شكل ١٢,٣(أ، ب) دورة المضخة الحرارية لإذابة الصقيع. وفي هذه الدورة يُعكَس اتجاه سريان المبرد خلال الدورة، فيصبح المبخر مكثفًا، والمكثف مبخرًا. ويتم هذا باستخدام صمام رباعي الاتجاه، كما هو مبين بالشكل. فعند بدء دورة إذابة الصقيع، يعدل وضع الصمام رباعي الاتجاه أوتوماتيًا، بحيث يسري الغاز الساخن من الضاغط إلى المبخر، مما يذيب الصقيع به. ويحوي نظام التبريد الذي يعمل بهذه الطريقة لإذابة الصقيع على صمام تمدد للمكثف يعمل فقط عند عكس الدورة. كذلك يضم النظام صمامين لا رجعيين لضمان سريان المبرد في الاتجاه الصحيح تبعًا لإيقاف أو تشغيل دورة إذابة الصقيع.

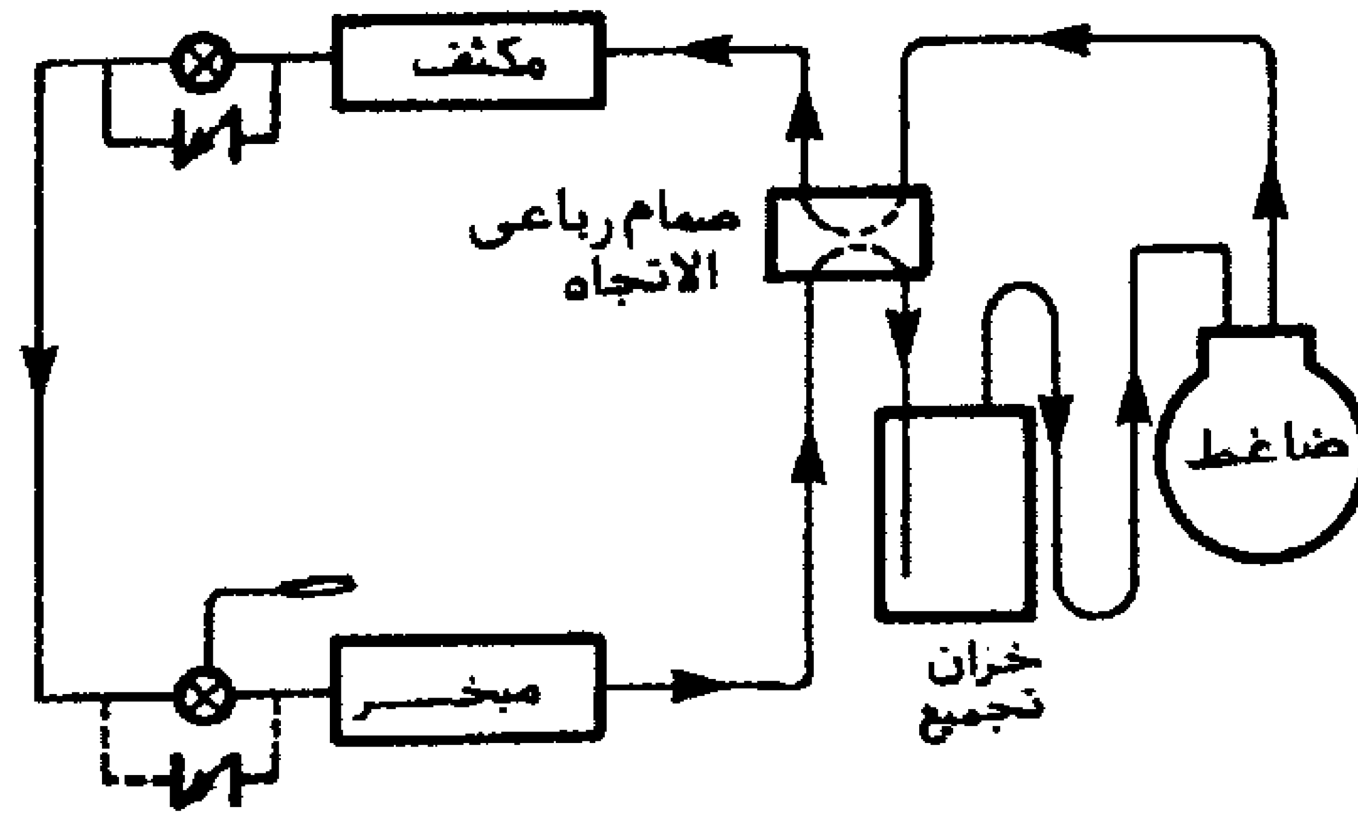


شكل ١٢,١ دورة تبريد بسيطة مع إذابة الصقيع بالغاز الساخن.

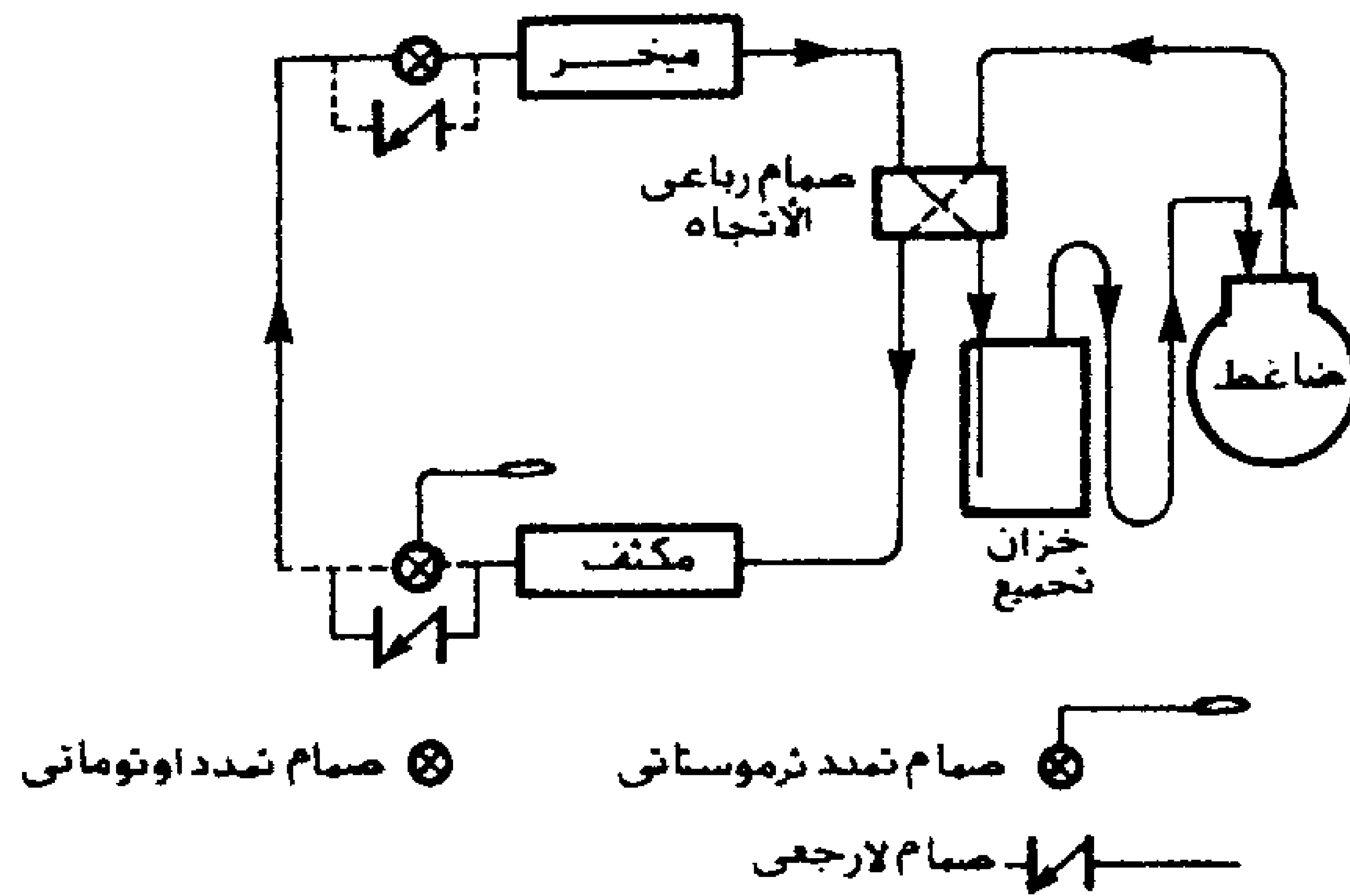


(تشغيل دورة التبريد المعتادة بجميع المبخرات ما عدا مبخر ١ حيث تعمل دورة إذابة الصقيع)

شكل ١٢,٢ دورة غاز ساخن لإذابة الصقيع بنظام تبريد ذي ثلاثة مبخرات.



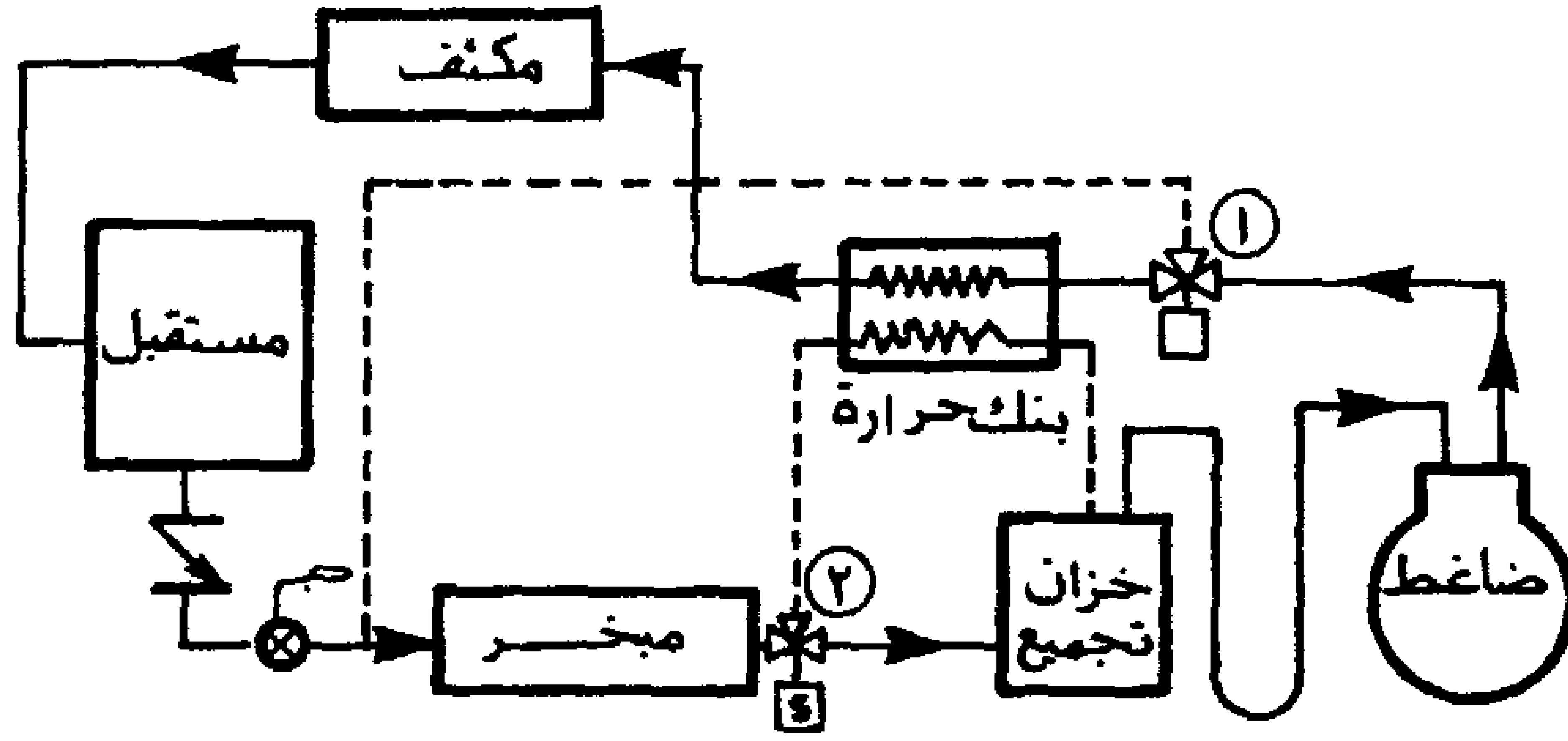
شكل ١٢,٣(أ) دورة مضخة حرارية لإذابة الصقيع: تشغيل دورة التبريد.



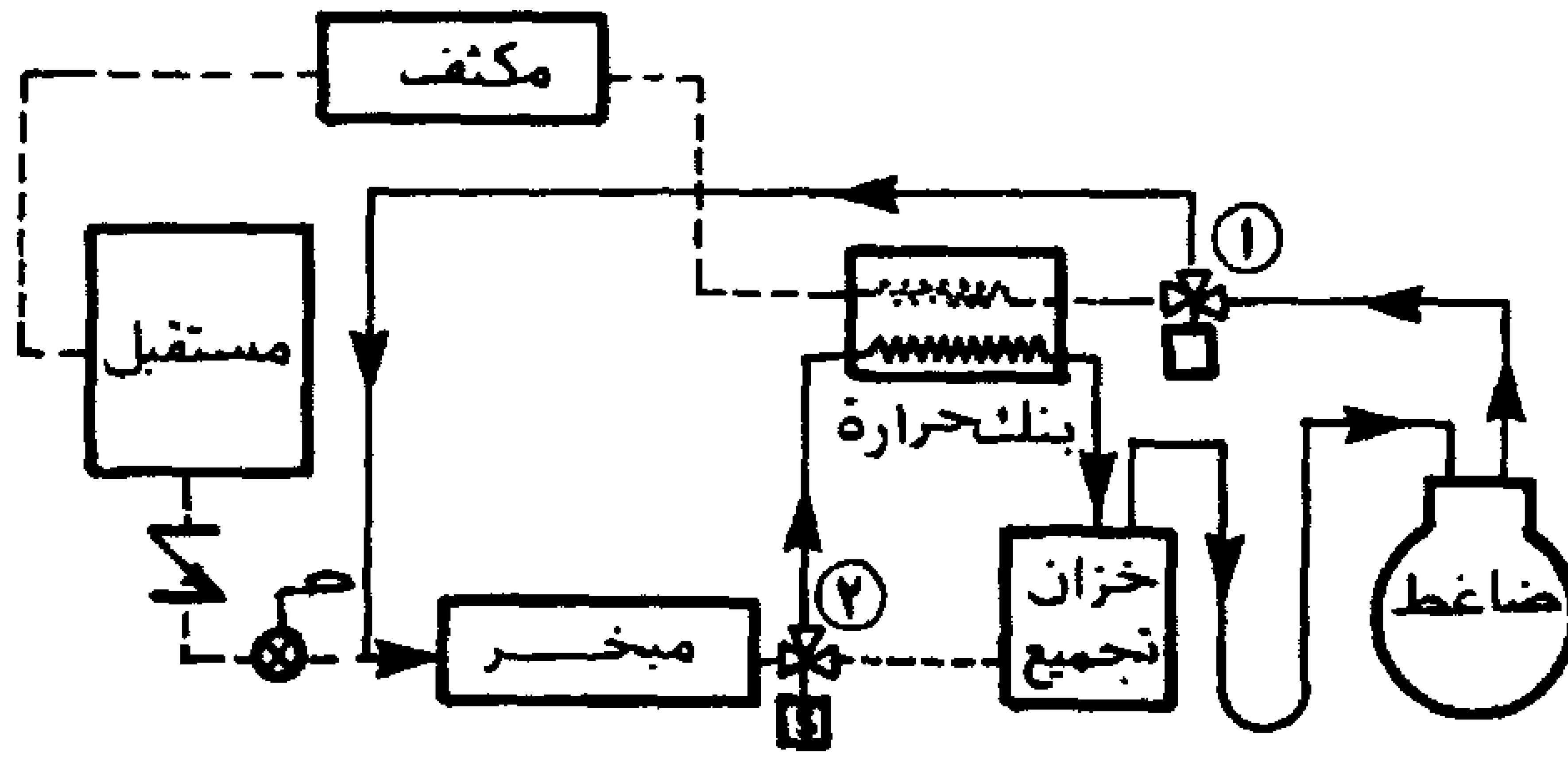
شكل ١٢,٣(ب) دورة مضخة حرارية لإذابة الصقيع: تشغيل دورة إذابة الصقيع.

ويبين شكل ١٢,٤ (أ، ب) استخدام طريقة تخزين الحرارة (بنك حرارة) مع دورة إذابة الصقيع بالغاز الساخن. وفي هذه الطريقة يحوي نظام التبريد خزان ماء يتم تسخينه - أثناء تشغيل دورة التبريد- بالغاز الساخن قبل مرور هذا الغاز إلى المكثف. عند بدء دورة إذابة الصقيع يُوَصّل الغاز الساخن مباشرة بنقطة دخول المبخر، وذلك بتعديل وضع صمام الملف اللولبي١. بمرور الغاز الساخن يذوب الصقيع ويكثف الغاز إلى سائل. يمر سائل المبرد خلال صمام الملف اللولبي٢ (بعد تعديل وضعه أوتوماتيًا) إلى خزان الماء (بنك الحرارة) فيتم تبخيره إلى خط سحب الضاغط. ويلزم في هذه الدورة استخدام خزان تجميع لحماية الضاغط من دخول أي قطرات سائل إليه. وبانتهاء دورة إذابة الصقيع،

يعدل وضع الصمامين ١و٢ إلى وضعهما الطبيعي بدورة التبريد، وتبدأ عملية تسخين ماء الخزان الحراري مرة أخرى، وهكذا.



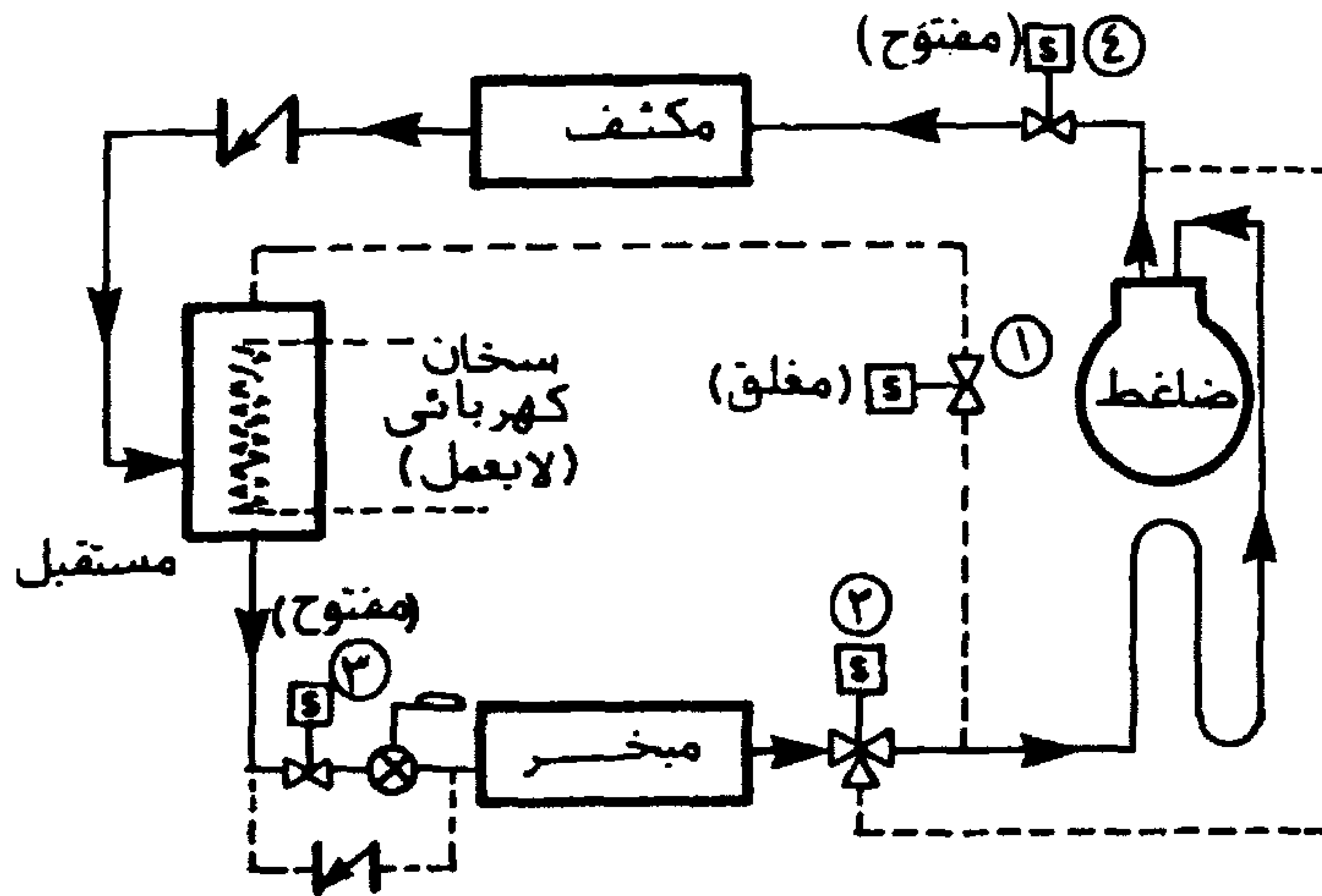
شكل ١٢,٤ (أ) دورة غاز ساخن لإذابة الصقيع باستخدام بنك الحرارة: تشغيل دورة التبريد.



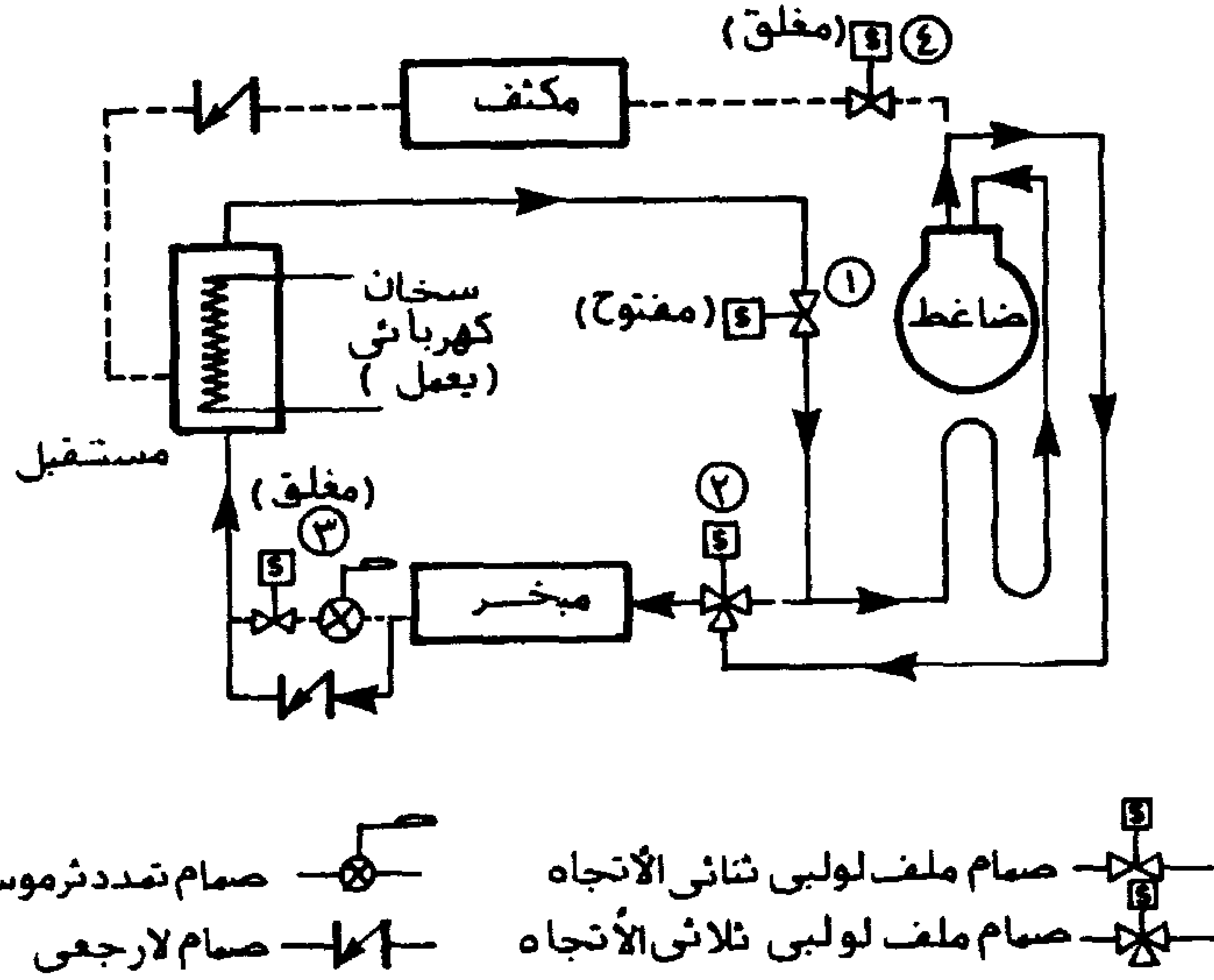
شكل ١٢,٤ (ب) دورة غاز ساخن لإذابة الصقيع باستخدام بنك الحرارة: تشغيل دورة إذابة الصقيع.

يبين شكل ١٢,٥ (أ، ب) دورة إذابة الصقيع بطريقة الغاز الساخن باستخدام مصدر كهربائي للحمل الحراري أثناء الدورة. يوضع السخان الكهربائي في المستقبل، ولا يعمل هذا السخان أثناء التشغيل المعتاد لدورة التبريد (الشكل ١٢,٥أ). عند بدء تشغيل دورة إذابة الصقيع (الشكل ١٢,٥ب)

يفتح صمام الملف اللولبي ١ ويُغلق صماما الملف اللولبي ٣ و٤، ويُعدل وضع صمام الملف اللولبي ٢ ليسمح بدخول الغاز الساخن القادم من الضاغط إلى المبخر. ويكثف الغاز الساخن بالمبخر إلى سائل نتيجة إذابة صقيع المبخر، ويخرج هذا السائل خلال الصمام غير المرجع إلى المستقبل. بتشغيل دورة إذابة الصقيع، يصل التيار الكهربائي إلى السخان، فيعمل كحمل حراري للمستقبل، مما ينتج عنه إمداد الضاغط ببخار المبرد اللازم لعمل الضاغط خلال صمام الملف اللولبي ١. بانتهاء دورة إذابة الصقيع يقطع التيار عن السخان الكهربائي ويغلق صمام الملف اللولبي ١، ويُفتح صماما الملف اللولبي ٣ و٤، ويُعدل صمام الملف اللولبي ٢ وضعه ليصل خروج المبخر بخط سحب الضاغط. عندئذ تبدأ الوحدة في العمل بدورة التبريد المعتادة.

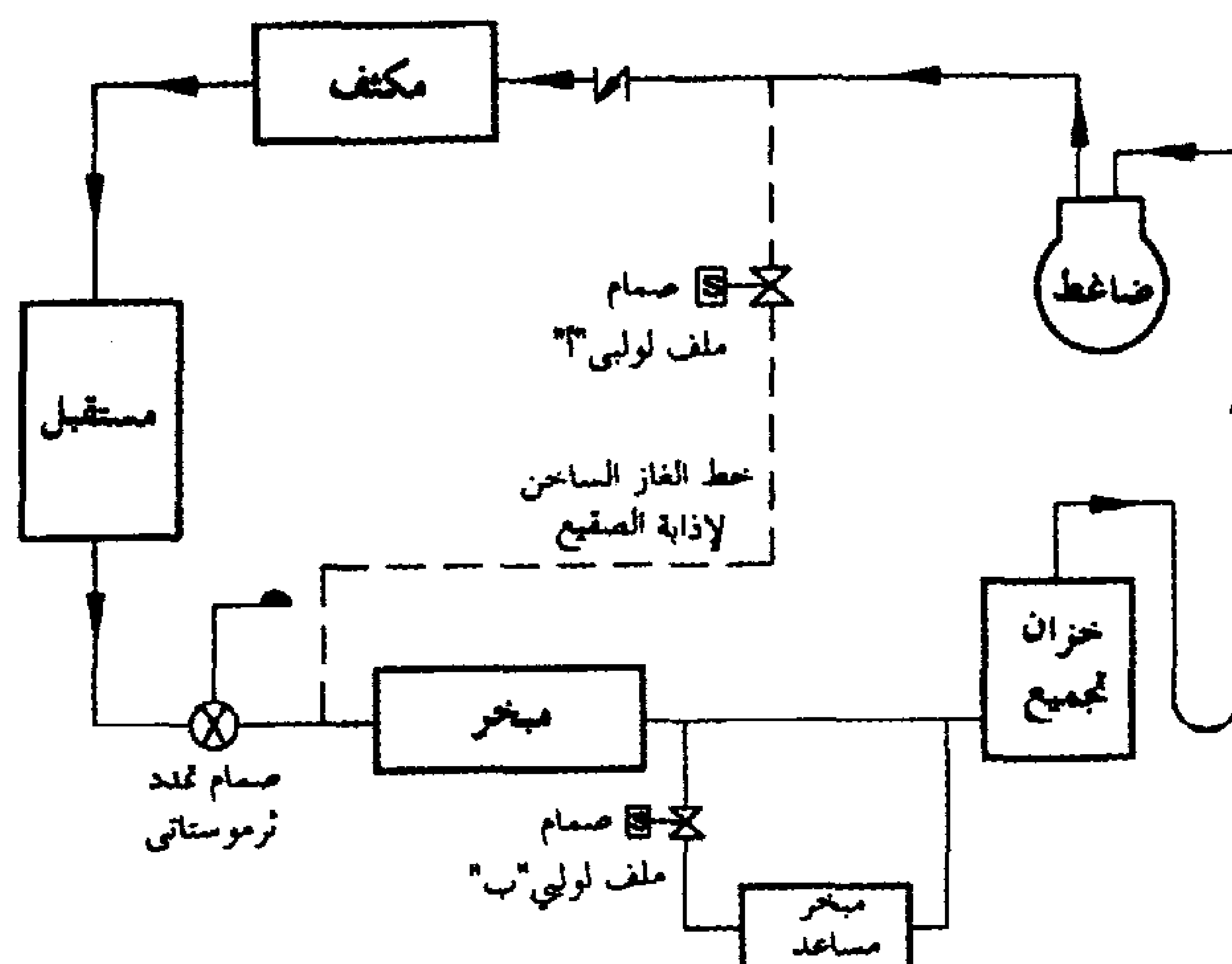


شكل ١٢,٥ (أ) دورة غاز ساخن لإذابة الصقيع باستخدام سخان كهربائي: تشغيل دورة التبريد.



شكل ١٢,٥ (ب) دورة غاز ساخن لإذابة الصقيع باستخدام سخان كهربائي: تشغيل دورة إذابة الصقيع.

ويبين شكل ١٢,٦ استخدام مبخر مساعد مع دورة إذابة الصقيع بالغاز الساخن من الضاغط. فكما هو واضح، تماثل دورة التبريد بشكل ١٢,٦ تلك التي بشكل ١٢,١ إلا أن دورة التبريد بشكل ١٢,٦ تحوي مبخر مساعد وصمام ملف لولبي إضافي. فعند العمل المعتاد لدورة التبريد يغلق صماما الملف اللولبي " أ " و "ب"، فإذا بدأت دورة إذابة الصقيع فُتح كلا الصمامين " أ " و "ب"، مما يسمح بمرور الغاز الساخن إلى المبخر مسببًا إذابة الصقيع به، وبالتالي تكثيف الغاز الساخن. ويسري سائل المبرد الناتج عن هذا التكثيف إلى المبخر المساعد الذي يعمل على تبخير هذا السائل وضمان استمرار وصول بخار المبرد إلى الضاغط، وبالتالي استمرار عمله بالشكل المناسب لضمان إمداد الغاز الساخن اللازم لعملية إذابة الصقيع. فإذا انتهت دورة إذابة الصقيع أُغلق الصمامان " أ " و "ب" وعملت دورة التبريد بشكلها المعتاد.



شكل ١٢,٦ دورة تبريد بسيطة مع إذابة الصقيع بالغاز الساخن من الضاغط واستخدام مبخر مساعد.

ولمزيد من التفاصيل حول طرق إذابة الصقيع وتشغيلها، والتحكم فيها واستخداماتها في التطبيقات المختلفة يمكن للقارئ الرجوع إلى [Dossat 1981, Pita 1984, Gosney 1982, ASHRAE 1988, ASHRAE 1994].

١٢,٤ تصميم خطوط الغاز الساخن لإذابة الصقيع

لا توجد طريقة هندسية واضحة لتصميم خطوط الغاز الساخن إلى المبخر لإذابة الصقيع به [ASHRAE 1994]. ويعزى هذا إلى أن خطوط الغاز الساخن تعمل لفترات قصيرة، مما يعني أن فقد الضغط خلال هذه الخطوط لا يؤثر بشكل محسوس على اقتصاديات تشغيل هذه الخطوط. ولقد أوصت جمعية آشري [ASHRAE 1994] باتخاذ الآتي عند تصميم هذه الخطوط:

أ- أن تميل هذه الخطوط في اتجاه المبخر لضمان سريان أي سائل ناتج عن تكثف بخار المبرد بخط الغاز الساخن إلى المبخر.

ب- فرض معدل سريان الغاز الساخن الساري لكل مبخر مساويًا ضعف أو ثلاثة أضعاف معدل سريان المبرد اللازم لحمل التبريد بالمبخر.

ج- أخذ سرعة سريان الغاز الساخن بخطوط إذابة الصقيع ما بين ٥م/ث إلى ١٥م/ث.

ونلاحظ من التوصيتين ب و ج السابقتين عدم تحديد قيم ثابتة في التصميم، وأن القيم المعطاة للاسترشاد بها فقط. ويبين جدول ١٢,١ معدل سريان المبرد لمقاسات مختلفة من مواسير النحاس والصلب عند استخدامها بخطوط إذابة الصقيع لمبرد ١٣٤أ ومبرد ٢٢ ومبرد ٥٠٢، مع سرعة سريان قدرها ٥م/ث، و١٠م/ث، و١٥م/ث. ويلاحظ أن معدل سريان المبرد بجدول ١٢,١ محسوب عند درجة حرارة مكثف قدرها ٢١°م. ويوضح المثال التالي استخدام الجدول.

مثال ١٢,١

احسب قطر مواسير النحاس المستخدمة لخط الغاز الساخن لإذابة الصقيع لمبخر يعمل عند درجة حرارة -١٠°م، وله حمل تبريد قدره ٣٠ كيلووات. افرض استخدام مبرد ٢٢.

الحل

بفرض دورة تبريد بسيطة، وأن الخروج من المبخر عند حالة التشبع (الحالة ١)، وأن الخروج من المكثف عند حالة التشبع (الحالة ٣)، وبفرض درجة حرارة المكثف تساوى ٢١°م كما هو الحال بجدول ١٢,١. وباستخدام جداول مبرد ٢٢ بملحق أ، نجد أن

$$h_1 = 401.20\,\text{kJ/kg} \quad h_3 = 225.3\,\text{kJ/kg}$$

جدول ١٢,١ معدل سريان الغاز الساخن بخطوط إذابة الصقيع لمقاسات مختلفة من المواسير[ASHRAE 1994] .

المقاس الأسمى للماسورة	مبرد ١٣٤ أ معدل السريان , كجم/ث			مبرد ٢٢ معدل السريان , كجم/ث			مبرد ٥٠٢ معدل السريان , كجم/ث		
مم	السرعة ٥ م/ث	السرعة ١٠ م/ث	السرعة ١٥ م/ث	السرعة ٥ م/ث	السرعة ١٠ م/ث	السرعة ١٥ م/ث	السرعة ٥ م/ث	السرعة ١٠ م/ث	السرعة ١٥ م/ث
نحاس									
١٥	٠,١١٧	٠,٢٣٥	٠,٣٥٢	٠,١٦٢	٠,٣٢١٣	٠,٤٨٥	٠,٢٤٤	٠,٤٨٧	٠,٧٣١
١٨	٠,١٩١	٠,٣٨١	٠,٥٧٢	٠,٢٦٢	٠,٥٢٥	٠,٧٨٧	٠,٣٩٦	٠,٧٩٢	١,١٨٨
٢٢	٠,٢٨٩	٠,٥٧٧	٠,٨٦٦	٠,٣٩٨	٠,٧٩٥	١,١٩٣	٠,٦٠٠	١,١٩٩	١,٧٩٩
٢٥	٠,٤٤٢	٠,٨٨٤	١,٣٢٦	٠,٦٠٩	١,٢١٨	١,٨٢٧	٠,٩١٨	١,٨٣٧	٢,٧٥٥
٢٨	٠,٧٣٩	١,٤٧٨	٢,٢١٦	١,١٠٨	٢,٠٣٦	٣,٠٥٤	١,٥٣٥	٣,٠٧١	٤,٦٠٦
٣٥	١,١٧٠	٢,٣٤٠	٣,٥١٠	١,٦١٠	٣,٢٢٠	٤,٨٣٠	٢,٤٣٠	٤,٨٦٠	٧,٢٩٠
٤٢	١,٧٢٠	٣,٤٣٠	٥,١٤٠	٢,٣٦٠	٤,٧٣٠	٧,٠٩٠	٣,٥٦٠	٧,١٣٠	١٠,٦٩٠
٥٤	٢,٨٩٠	٥,٧٧٠	٨,٦٦٠	٣,٩٨٠	٧,٩٥٠	١١,٩٣٠	٦,٠٠٠	١٢,٠٠٠	١٧,٩٩٠
٦٧	٤,٤٧٠	٨,٩٥٠	١٣,٤٢٠	٦,١٦٠	١٢,٣٣٠	١٨,٤٩٠	٩,٣٠٠	١٨,٦٠٠	٢٧,٨٩٠
٧٩	٦٠٢٤٠	١٢,٤٨٠	١٨,٧٢٠	٨,٦٠٠	١٧,١٩٠	٢٥,٧٩٠	١٢,٩٧٠	٢٥,٩٣٠	٣٨,٩٠٠
٩٢	١١٠١٠٠	٢٢,٣٠٠	٣٣,٤٠٠	١٥,٣٠٠	٣٠,٧٠٠	٤٦,٠٠٠	٢٣,١٠٠	٤٦,٣٠٠	٦٩,٤٠٠
١٠٥	١٧,٣٠٠	٣٤,٦٠٠	٥١,٨٠٠	٢٣,٨٠٠	٤٧,٦٠٠	٧١,٤٠٠	٣٥,٩٠٠	٧١,٨٠٠	١٠٨,٠٠
١٣٠	٢٥,٠٠٠	٥٠,١٠٠	٧٥,١٠٠	٣٤,٥٠٠	٦٩,٠٠٠	١٠٣,٠٠	٥٢,٠٠٠	١٠٤,٠٠	١٥٦,٠٠
١٥٦	٤٣,٣٠٠	٨٦,٦٠٠	١٣٠,٠٠	٥٩,٧٠٠	١١٩,٠٠	١٧٩,٠٠	٩٠,٠٠٠	١٨٠,٠٠	٢٧٠,٠٠
٢٠٦	٦٧,٣٠٠	١٣٥,٠٠	٢٠٢,٠٠	٩٢,٨٠٠	١٨٦,٠٠	٢٧٨,٠٠	١٣٩,٩٠	٢٨٠,٠٠	٤٢٠,٠٠
صلب ٨٠									
١٠	٠,١٧٧	٠,٣٥٤	٠,٥٣٠	٠,٢٤٤	٠,٤٨٧	٠,٧٣١	٠,٣٦٧	٠,٧٣٥	١,١٠٠
١٥	٠,٢٨١	٠,٥٦٣	٠,٨٤٤	٠,٣٨٨	٠,٧٥٥	١,١٦٣	٠,٥٨٥	١,١٧٠	١,٧٥٠
٢٠	٠,٤٩٤	٠,٩٨٨	١,٤٨١	٠,٦٨٠	١,٣٦١	٢,٠٤١	١,٠٢٦	٢,٠٥٠	٣,٠٨٠
٢٥	٠,٧٩٩	١,٦٠٠	٢,٤٠٠	١,١٠١	٢,٢٠١	٣,٣٠٢	١,٦٦٠	٣,٣٢٠	٤,٩٨٠
صلب ٤٠									
٣٢	١,٣٨٥	٢,٧٧٠	٤,١٦٠	١,٩٠٨	٣,٨١٦	٥,٧٣٠	٢,٨٨٠	٥,٧٦٠	٨,٦٤٠
٤٠	١,٨٩٠	٣,٧٧٠	٥,٦٦٠	٢,٦٠٠	٥,٢٠٠	٧,٧٩٠	٣,٩٢٠	٧,٨٤٠	١١,٨٠٠
٥٠	٣,١١٠	٦,٢١٠	٩,٣٢٠	٤,٢٨٠	٨,٥٦٠	١٢,٨٠٠	٦,٤٦٠	١٢,٩٠٠	١٩,٤٠٠
٦٥	٤,٤٣٠	٨,٨٦٠	١٣,٣٠٠	٦,١٠٠	١٢,٢٠٠	١٨,٣٠٠	٩,٢١٠	١٨,٤٠٠	٢٧,٦٠٠
٨٠	٦,٨٤٠	١٣,٧٠٠	٢٠,٥٠٠	٩,٤٣٠	١٨,٩٠٠	٢٨,٣٠٠	١٤,٢٠٠	٢٨,٤٠٠	٤٢,٧٠٠

المقاس الأسمى للماسورة	مبرد ١٣٤ أ معدل السريان ، كجم/ث			مبرد ٢٢ معدل السريان ، كجم/ث			مبرد ٥٠٢ معدل السريان ، كجم/ث		
مم	السرعة ٥ م/ث	السرعة ١٠ م/ث	السرعة ١٥ م/ث	السرعة ٥ م/ث	السرعة ١٠ م/ث	السرعة ١٥ م/ث	السرعة ٥ م/ث	السرعة ١٠ م/ث	السرعة ١٥ م/ث
١٠٠	١١,٨٠٠	٢٣,٦٠٠	٣٥,٤٠٠	١٦,٢٠٠	٣٢,٥٠٠	٤٨,٧٠٠	٢٤,٥٠٠	٤٩,٠٠٠	٧٣,٥٠٠
١٢٥	١٨,٥٠٠	٣٧,٠٠٠	٥٥,٥٠٠	٢٥,٥٠٠	٥١,٠٠٠	٧٦,٥٠٠	٣٨,٥٠٠	٧٦,٩٠٠	١١٥,٠٠
١٥٠	٢٦,٨٠٠	٥٣,٥٠٠	٨٠,٣٠٠	٣٦,٩٠٠	٧٣,٧٠٠	١١١,٠٠	٥٥,٦٠٠	١١١,٠٠	١٦٧,٠٠
٢٠٠	٤٦,٣٠٠	٩٢,٦٠٠	١٣٩,٠٠	٦٣,٨٠٠	١٢٨,٠٠	١٩١,٠٠	٩٦,٣٠٠	١٩٣,٠٠	٢٨٩,٠٠
٢٥٠	٧٣,٠٠٠	١٤٦,٠٠	٢١٩,٠٠	١٠١,٠٠	٢٠١,٠٠	٣٠٢,٠٠	١٥٢,٠٠	٣٠٣,٠٠	٤٥٥,٠٠
٣٠٠	١٠٥,٠٠	٢٠٩,٠٠	٣١٤,٠٠	١٤٤,٠٠	٢٨٩,٠٠	٤٣٣,٠٠	٢١٨,٠٠	٤٣٥,٠٠	٦٥٣,٠٠

وعليه نجد أن معدل سريان المبرد خلال المبخر يعطي كما يلي

$$\dot{m}=\frac{30}{401.20-225.3}=0.171 \quad kg/s$$

وبفرض ضعف هذه القيمة لمعدل سريان المبرد خلال خط إذابة الصقيع، أي

$$\dot{m}_{def}=2\times 0.171=0.341 \quad kg/s$$

عندئذ من جدول ١٢,١، وبفرض سرعة سريان بين ٥ إلى ١٠م/ث بخط إذابة الصقيع نختار ماسورة نحاس قطرها الاسمي هو ١٨مم.

١٢,٥ اعتبارات هندسية

يجب هندسيا السماح بتصريف الماء الناتج من إذابة الصقيع إلى خارج غرفة التبريد وعدم سقوطه إلى داخل الغرفة أو تراكمه في حوض الصرف، مما يؤدي إلى تبخره إلى هواء الغرفة مرة أخرى، أو تجمده في حوض الصرف وبالتالي إعاقة خروج الصرف إلى خارج الغرفة. لهذا السبب يوضع سخان كهربائي عادة في حوض الصرف لمنع تجمد الماء الناتج عن إذابة الصقيع، ويعمل هذا السخان بنفس الوقت التي تعمل به دورة إذابة الصقيع. أيضًا، يجب

مراعاة إيقاف مروحة الهواء بملف التبريد أثناء دورة الصقيع لمنع سريان الهواء خلال ملف التبريد، وبالتالي الحد من حمل التبريد الناتج عن الحرارة المستخدمة لإذابة الصقيع، وأيضًا لضمان عدم حمل جزء من الماء المذاب إلى غرفة التبريد. وتعمل مروحة ملف التبريد بتخلف زمني بعد انتهاء دورة إذابة الصقيع بعدة دقائق لضمان تصريف معظم الماء المذاب، وتجمد ما بقى منه على سطح الملف، وبالتالي لا يمكن للهواء حمله إلى غرفة التبريد، وأيضًا لإعطاء بعض الوقت للمبرد داخل ملف التبريد من تبريد سطح الملف إلى درجة حرارة مناسبة لتبريد الهواء.

كما يجب أيضا وضع مصيدة سائل في خط الصرف من الجهة الخارجية لغرفة التبريد. وتعمل هذه المصيدة كحاجز لتسرب الهواء الخارجي إلى غرفة التبريد من خلال ماسورة الصرف. فإذا كان هناك احتمال لتجمد السائل بهذه المصيدة نتيجة وجودها في منطقة درجة حرارتها أقل من الصفر المئوي، لزم استخدام سخان كهربائي على هذه المصيدة، ويعمل هذا السخان مع دورة إذابة الصقيع لملف التبريد المتصل بخط الصرف الذي به هذه المصيدة، ويتم التحكم في دورة إذابة الصقيع إما يدويًا أو أوتوماتيا. ففي الحالة الأولى تبدأ الدورة وتنتهي يدويا، مما يعنى ضرورة توفير العمالة اللازمة لذلك مع توقع الأخطاء الناشئة عن العامل البشري، من حيث التأخر في بدء دورة إذابة الصقيع أو التأخر في إيقافها. وتستخدم الطريقة اليدوية للتحكم في دورة إذابة الصقيع في الحالات التي تعمل فيها هذه الدورة على فترات بعيدة مثل مرة كل شهر أو أكثر.

ويعتبر التحكم الأوتوماتي في دورة إذابة الصقيع أكثر مصداقية من التحكم اليدوي، وهناك عدة احتمالات للتحكم الأوتوماتي في دورة إذابة الصقيع. ومن هذه الاحتمالات الآتي :

استخدام ساعة توقيت (مؤقت) لبدء و/أو إيقاف الدورة.
استخدام إشارة ما لبدء و/أو إيقاف الدورة.

ويمكن بالطبع الخلط بين أي من الاحتمالات السابقة. فمثلاً، يمكن أن تبدأ دورة إذابة الصقيع بساعة توقيت ثم توقف الدورة تبعًا لإشارة ما. ومن أهم الإشارات المستخدمة لبدء دورة الصقيع أو إيقافها درجة حرارة سطح ملف التبريد، أو ضغط المبرد داخل ملف التبريد، أو سرعة مرور الهواء خلال ملف التبريد، أو فرق الضغط بين دخول وخروج الهواء من ملف التبريد. فمثلاً، يمكن أن تبدأ دورة إذابة الصقيع إذا قلت سرعة سريان الهواء خلال ملف التبريد عن حد معين، مما يعني تكون صقيع بقدر كبير على ملف التبريد. كما يمكن أيضًا بدء دورة إذابة الصقيع إذا زاد فرق الضغط بين دخول وخروج الهواء من ملف التبريد عن حد معين، وهكذا.

الفصل الثالث عشر
الضواغط

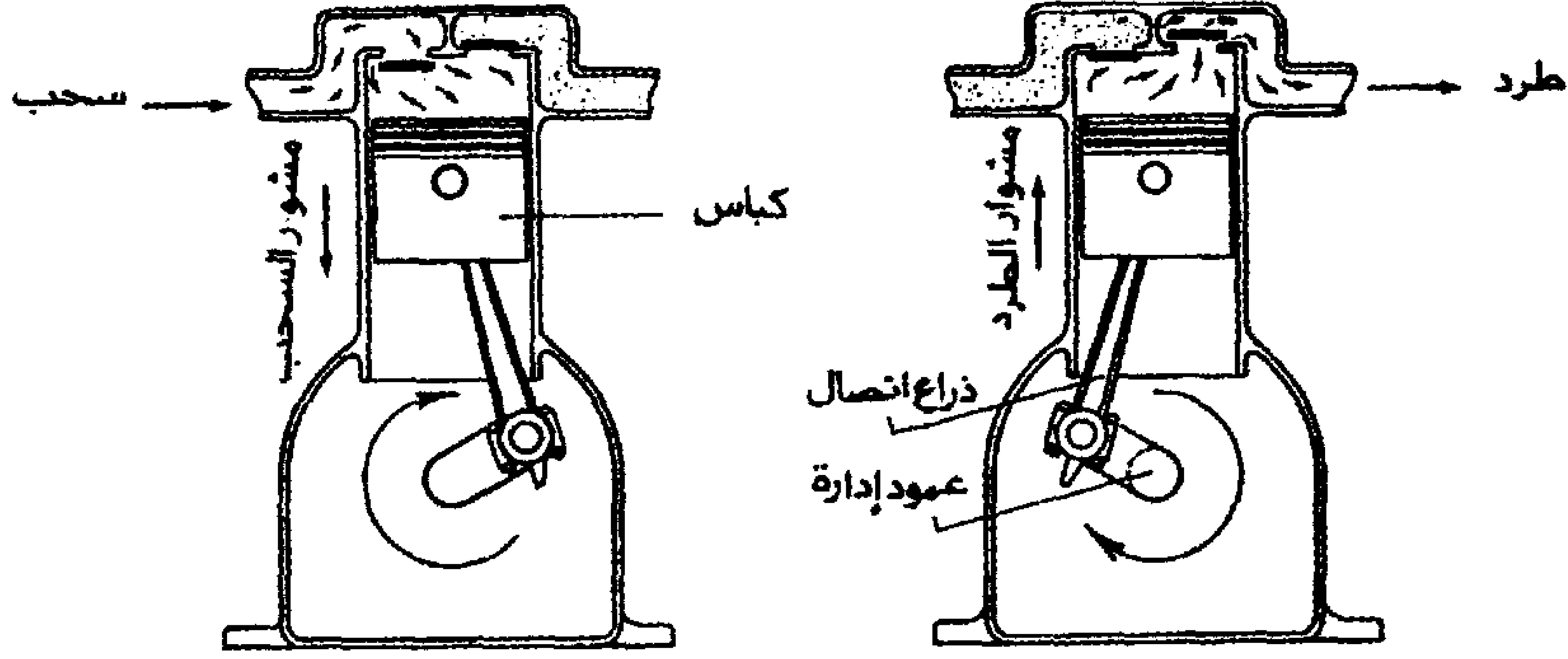
١٣,١ مقدمة

الضاغط هو قلب نظام التبريد بانضغاط البخار. فبدون وجود الضاغط لا وجود لنظام التبريد. يعمل الضاغط على دوران المبرد في دائرة التبريد ورفع ضغطه من ضغط المبخر إلى ضغط المكثف حتى يمكن تكثيف هذا البخار وعودته مرة أخرى إلى المبخر. تقسم الضواغط إلى ضواغط تعمل بالإزاحة الموجبة وأخرى تعمل بالطرد المركزي. وتضم الضواغط التي تعمل بالإزاحة الموجبة عدة أنواع منها: الضواغط الترددية، والضواغط الدورانية، والضواغط اللولبية، وغيرها. وتعتبر الضواغط الترددية والضواغط اللولبية من أكثر الضواغط استخدامًا في نظم تبريد غرف التبريد. لذلك سنقدم فيما يلي عرضًا مبسطًا لهذين النوعين فقط من الضواغط.

١٣,٢ الضواغط الترددية

١٣,٢,١ طريقة العمل

تعتبر الضواغط الترددية من أكثر الضواغط شيوعًا في تطبيقات غرف التبريد. وتستخدم هذه الضواغط مع نظم الهالوكربونات والأمونيا على السواء. ويتكون الضاغط الترددي كما هو مبين بشكل ١٣,١ من كباس يتحرك داخل أسطوانة مسدودة النهاية. وتعرف نهاية الأسطوانة برأس الأسطوانة وتحوي عادة صمامي دخول وخروج المبرد إلى ومن الأسطوانة.



شكل ١٣,١ رسم تخطيطي لضاغط ترددي.

يتحرك الكباس داخل الأسطوانة تبعًا لدوران عمود إدارة يتصل بالكباس بذراع اتصال. وبدوران عمود الإدارة دورة كاملة يتحرك الكباس داخل الأسطوانة مشوارين، أحدهما يسمى مشوار السحب والآخر يسمى مشوار الطرد، كما هو مبين بالشكل. ففي مشوار السحب، تسبب حركة الكباس خفض ضغط الغاز داخل الأسطوانة نتيجة التمدد (أي زيادة حجم الغاز)، فإذا قل ضغط الغاز داخل الأسطوانة عن ضغط خط السحب، يفتح هذا الصمام ويسحب الغاز إلى داخل الأسطوانة حتى نهاية مشوار السحب. فإذا وصل الكباس إلى أبعد نقطة له عن نهاية الأسطوانة يبدأ مشوار الطرد، أي حركة الكباس في اتجاه نهاية الأسطوانة، مما يعمل على رفع ضغط الغاز داخل الأسطوانة. بزيادة الضغط داخل الأسطوانة عن ضغط خط السحب يقفل صمام السحب في الحال. وباستمرار حركة الكباس في مشوار الطرد يستمر الضغط داخل الأسطوانة في الارتفاع، حتى إذا زاد هذا الضغط عن ضغط خط الطرد، فتح صمام الطرد عند نهاية الأسطوانة أوتوماتيكيا، فيسرى الغاز إلى الخارج بضغط يعادل ضغط الطرد. فإذا وصل الكباس إلى أقرب نقطة ممكنة له من نهاية الأسطوانة، يبدأ

الكباس في العودة مرة أخرى لمشوار السحب، مما يخفض الضغط داخل الأسطوانة، فيغلق صمام الطرد فورًا ويستمر مشوار السحب كما قدمنا سابقًا.

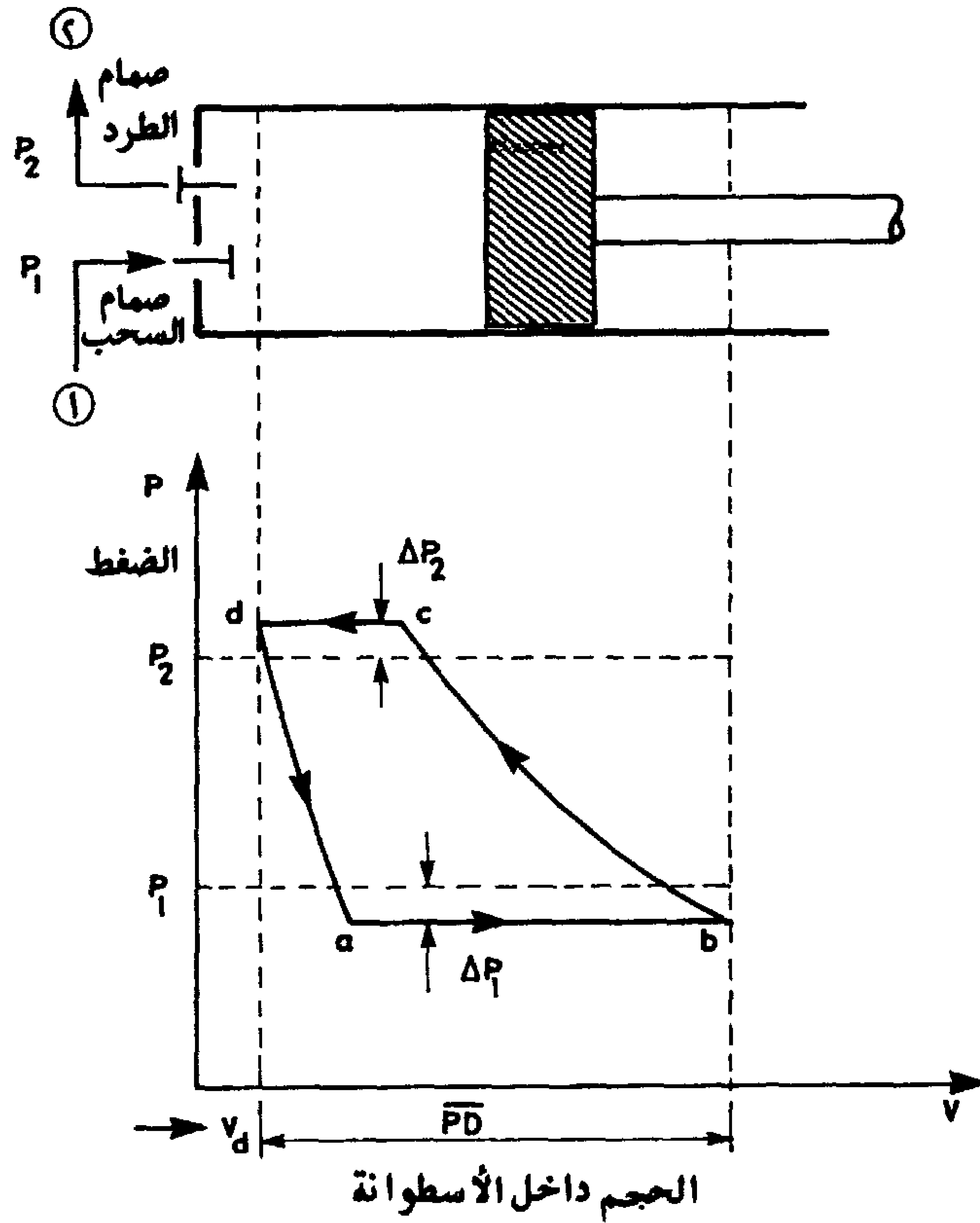
ويمكن تقسيم الضواغط الترددية إلى عدة أقسام تبعًا للخاصية المختارة للتقسيم، فمثلاً تكون هذه الضواغط فردية الفعل أو مزدوجة الفعل. ويكون الضاغط فردي الفعل إذا تم السحب والطرد عند وجه الكباس فقط . أما إذا تم السحب والطرد عند وجه الكباس ونهايته كان الضاغط مزدوج الفعل. كما تقسم الضواغط الترددية أيضًا تبعًا لعدد مراحل رفع الضغط بها. فإذا عمل الضاغط على رفع الضغط في مرحلة واحدة كان الضاغط أحادي المرحلة، أما إذا تم الضغط في مرحلتين كان الضاغط ثنائي المرحلة، وهكذا.

ويبين شكل ١٣,٢ العلاقة بين الضغط والحجم داخل أسطوانة الضاغط خلال مشواري السحب والطرد. وكما هو مبين بالرسم، يبدأ مشوار السحب من النقطة d وينتهي بالنقطة b مارًا بالنقطة a. كذلك يبدأ مشوار الطرد بالنقطة b وينتهي بالنقطة d مارًا بالنقطة c. ويلاحظ من الرسم الآتي:

أ) وجود حجم خلوص قدره V_d وهو الحجم المحصور داخل الأسطوانة عندما يصل الكباس إلى نهاية مشوار الطرد، ولا يمكن عمليًا تلاشي هذا الحجم حتى لا يلامس الكباس صفيحة الصمامات الموجودة برأس الأسطوانة.

ب) وجود فقد ضغط قدره ΔP_1 في خط السحب عند دخول البخار إلى الضاغط كنتيجة لاحتكاك السريان مع صمام السحب.

ج) وجود فقد ضغط قدره ΔP_2 عند سريان البخار المضغوط من الأسطوانة إلى خط الطـــرد (خط الغاز الساخن).



شكل ١٣,٢ علاقة الضغط بالحجم داخل أسطوانة ضاغط ترددي.

١٣,٢,٢ إزاحة الكباس

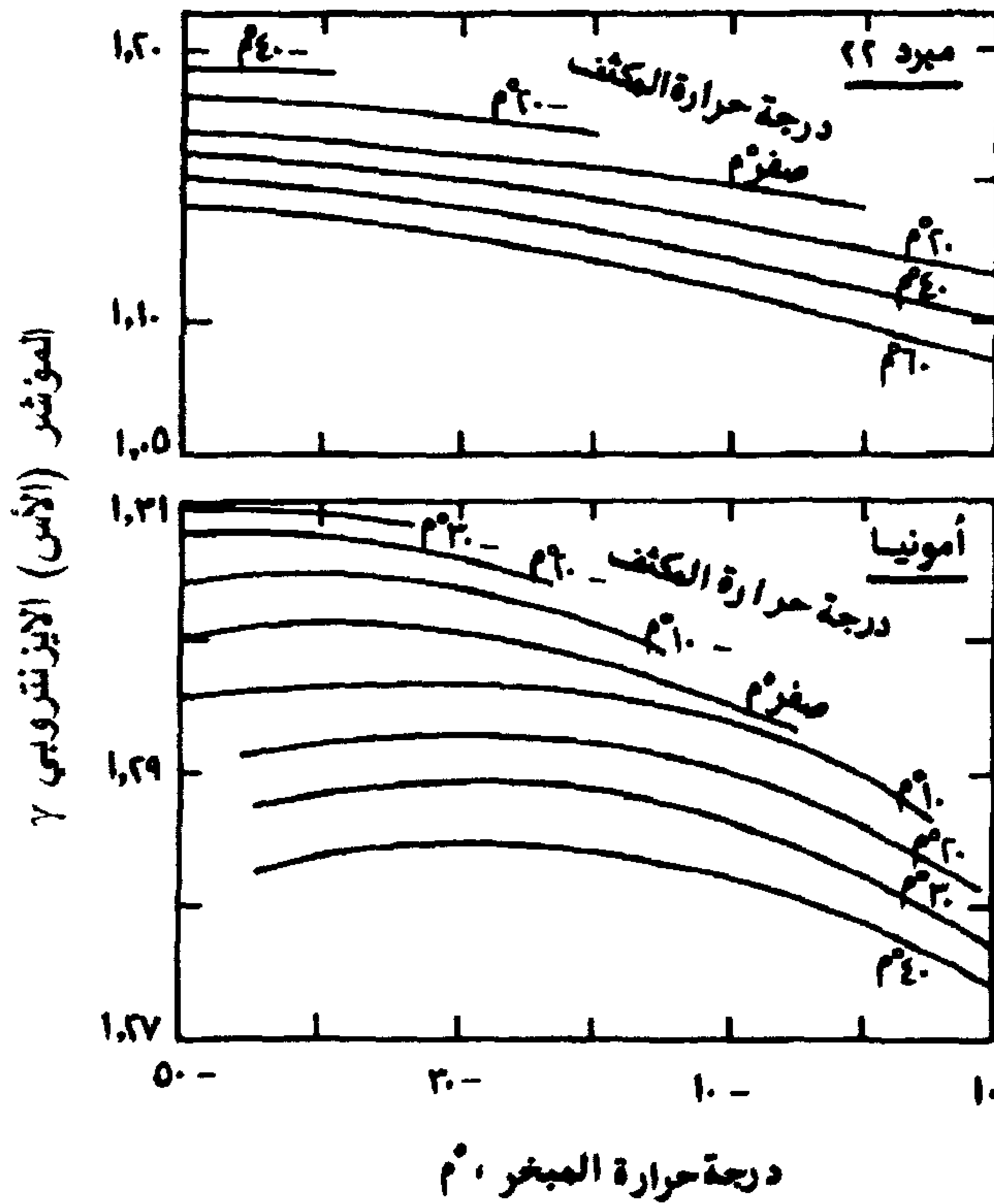
من شكل ١٣,٢ تعرف إزاحة الكباس النظرية، بأنها الحجم الذي يزيحه الضاغط في وحدة الزمن. فإذا كان عدد الأسطوانات بالضاغط هو N_C وكانت سرعة دوران عمود إدارة الضاغط هي N لفة/دقيقة، فإن حجم إزاحة الكباس عندئذ يكون كما يلي:

$$\overline{PD_a} = \frac{I}{60}\frac{\pi}{4}D^2 L N_c N \qquad (13.1)$$

حيث D و L هما قطر وطول المشوار على التوالي، و I هي عدد الفعل للكباس، وتأخذ I القيمة ١ أو ٢ إذا كان الضاغط فردي الفعل أو مزدوج الفعل على التوالي.

يلاحظ الآن أن إزاحة الكباس الفعلية تختلف عن القيمة السابقة، حيث إن الحجم المسحوب فعليًا للبخار يتم من النقطة a إلى النقطة b كما هو مبين بشكل ١٣,٢، وتكون إزاحة الكباس الفعلية كما يلي:

$$\overline{\mathrm{PD}_\mathrm{a}} = V_b - V_a \tag{13.2}$$



شكل ١٣,٣ تغير قيمة المؤشر الايزنتروبي لمبرد ٢٢ والأمونيا مع درجتي حرارة المبخر والمكثف [Gosney 1982].

عندئذ تعطى إزاحة الكباس الفعلية كما يلي:

$$\overline{\text{PD}}_a = \overline{\text{PD}}\left\{1 + C - C\, r_p^{1/n}\right\} \qquad (13.3)$$

حيث C هي نسبة حجم الخلوص V_d إلى إزاحة الكباس النظرية $\overline{\text{PD}}$ و r_p هي نسبة الانضغاط، أي نسبة ضغط الطرد P_d إلى ضغط السحب P_a . أما إذا كانت عملية التمدد والانضغاط أيزنتروبية، أي لم يكن هناك تبادل حراري بين البخار داخل الأسطوانة والمحيط به، وكانت عمليتا التمدد والانضغاط انعكاسيتين (أي اهمل الاحتكاك) فإن قيمة المؤشر البوليتروبي n تصبح مساوية لقيمة المؤشر الايزنتروبي γ (النسبة بين الحرارة النوعية عند ثبات الضغط إلى الحرارة النوعية عند ثبات الحجم). وتعتمد قيمة n على ضغط ودرجة حرارة المبرد المستخدم، ويبين شكل ١٣,٣ قيم γ المتوسطة عند مدى واسع لدرجتي حرارة المبخر والمكثف لمبرد ٢٢ والأمونيا.

١٣,٢,٣ الكفاءة الحجمية

تعرف الكفاءة الحجمية للضاغط الترددي بأنها النسبة بين معدل الكتلة الفعلي الذي قام الضاغط بمناولته إلى المعدل الظاهري للكتلة الذي يبدو أن الضاغط قام بمناولته، أي إن* (Threlkeld 1970&1998)

$$\eta_v = \frac{\dot{m}}{\overline{\text{PD}}/v_1} = \frac{\overline{\text{PD}}_a / v_b}{\overline{\text{PD}}/v_1} \qquad (13.4)$$

وتؤول هذه المعادلة إلى الآتي:

---

* تعرف الكفاءة الحجمية في بعض المراجع بأنها نسبة الحجم الفعلي المزاح للمبرد إلى الحجم الظاهري المزاح بالضاغط وهو تعريف يختلف عن التعريف المعطى هنا.

$$\eta_v = \frac{v_1}{v_b}\,(1 + C - C\, r_p^{1/n}) \qquad (13.5)$$

حيث v_1 هي الحجم النوعي لبخار المبرد بخط السحب قبل دخوله الضاغط و v_b هي الحجم النوعي عند نهاية مشوار السحب داخل الأسطوانة. ويلاحظ من العلاقة السابقة أن الكفاءة الحجمية للضاغط تقل بزيادة نسبة الانضغاط، لهذا السبب لا يفضل عادة استخدام الضواغط الترددية وحيدة المرحلة عند نسبة انضغاط مرتفعة. ومن المعادلتين السابقتين يعطى معدل سريان المبرد الذي يستطيع الضاغط مناولته كما يلي:

$$\dot{m} = \frac{1}{v_1}\,\overline{\mathrm{PD}}\,\eta_v \qquad (3.16)$$

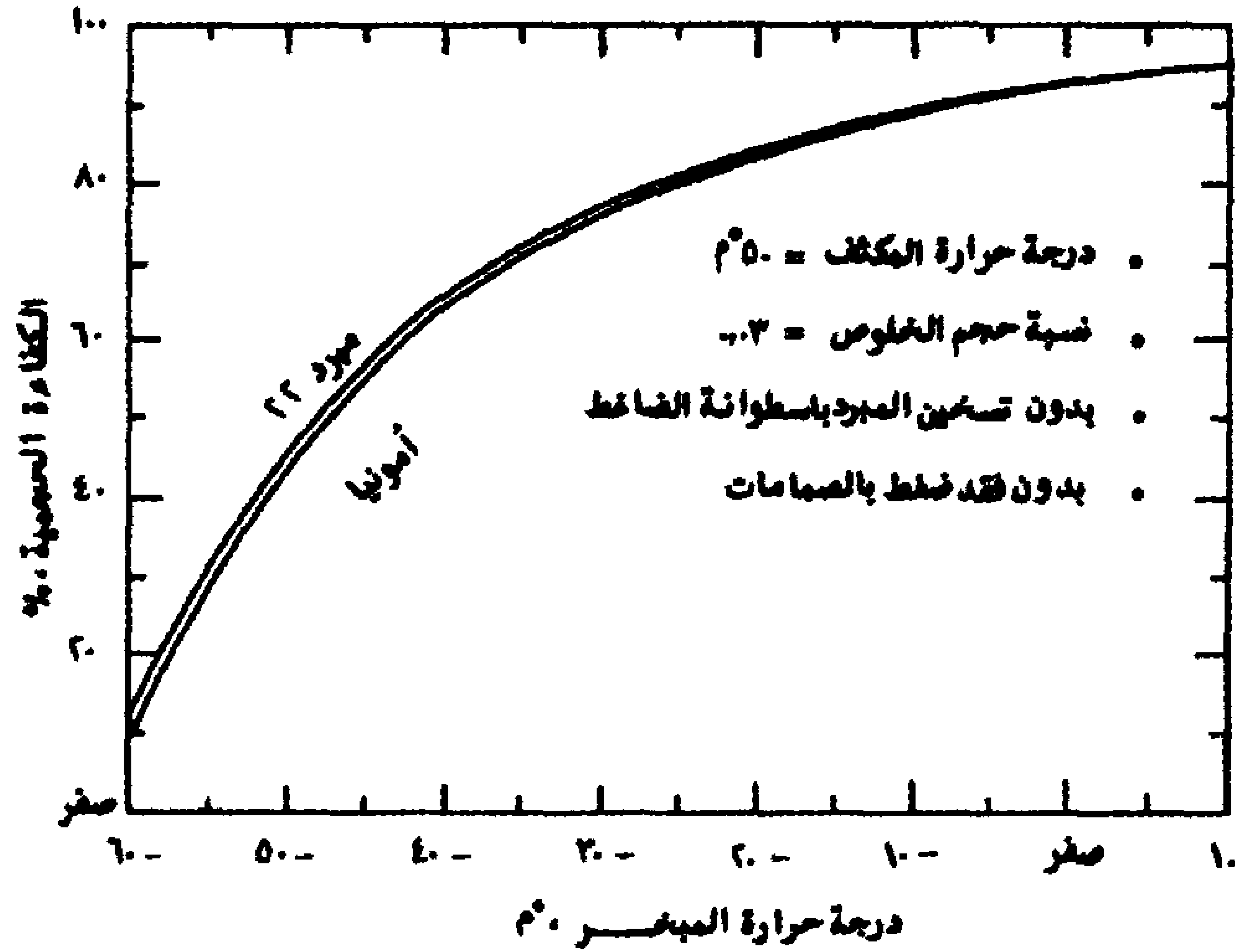
ويوضح شكل ١٣,٤ تغير الكفاءة الحجمية لضاغط ترددي وحيد المرحلة مع درجة حرارة المبخر لمبرد ٢٢ والأمونيا وذلك بفرض تساوى قيمتي v_b و v_1 ، ودرجة حرارة مكثف قدرها ٥٠°م، ونسبة خلوص C = ٠,٠٣ هذا، ولقد فرض أيضًا عند إعداد هذه العلاقة أن انضغاط المبرد تم خلال عملية أيزنتروبية.

١٣,٢,٤ سعة التبريد

يتم ضغط المبرد بالضاغط الترددي المثالي بعملية أيزنتروبية، أي عملية أدياباتية انعكاسية. عندئذ تعطى قدرة الانضغاط كما يلي:

$$\dot{W} = \dot{m}(h_1 - h_2) \qquad (13.7)$$

حيث h_1 و h_2 هما إنثالبي المبرد قبل صمام السحب وبعد صمام الطرد بالضاغط على التوالي. أما عمليًا، فيحيد الضاغط عن هذه العملية المثالية نتيجة الآتي:



شكل ١٣,٤ تغير الكفاءة الحجمية للضواغط الترددية مع درجة حرارة المبخر لمبرد ٢٢ والأمونيا.

أ) فقد ضغط المبرد عند سريانه خلال صمامي السحب والطرد.

ب) تسخين المبرد خلال مروره فوق الموتور في حالة الضواغط محكمة أو نصف محكمة الغلق.

ج) تسخين المبرد في أسطوانة الضاغط أثناء مشوار السحب.

د) انتقال الحرارة من المبرد إلى أسطوانة الضاغط أثناء مشوار الانضغاط، نتيجة تبريد الأسطوانة بالهواء المحيط أو بالماء في بعض الحالات.

هـ) الاحتكاك الناشئ عن السريان المضطرب للمبرد داخل أسطوانة الضاغط وكذلك احتكاك السريان مع جدار أسطوانة الضاغط.

ويلاحظ أن البند (هـ) عاليه يجعل عملية الانضغاط لا انعكاسية، أما البند (ج) فيجعل عملية الانضغاط لا أدياباتية، وينتج عن البنود (أ) و (ب) و (ج) عاليه اختلاف حالة المبرد عند بداية ونهاية عملية الانضغاط عن الدورة المثالية، حتى عندما لا يؤخذ التأثيران (د) و(هـ) في الاعتبار، مما يزيد القدرة اللازمة لانضغاط المبرد.

وبفرض إهمال البند (هـ) عاليه، يمكن القول أن انضغاط المبرد يتم بعملية بوليتروبية بدلاً من العملية الأيزنتروبية، عندئذ تعطى القدرة اللازمة لانضغاط المبرد كما يلي:

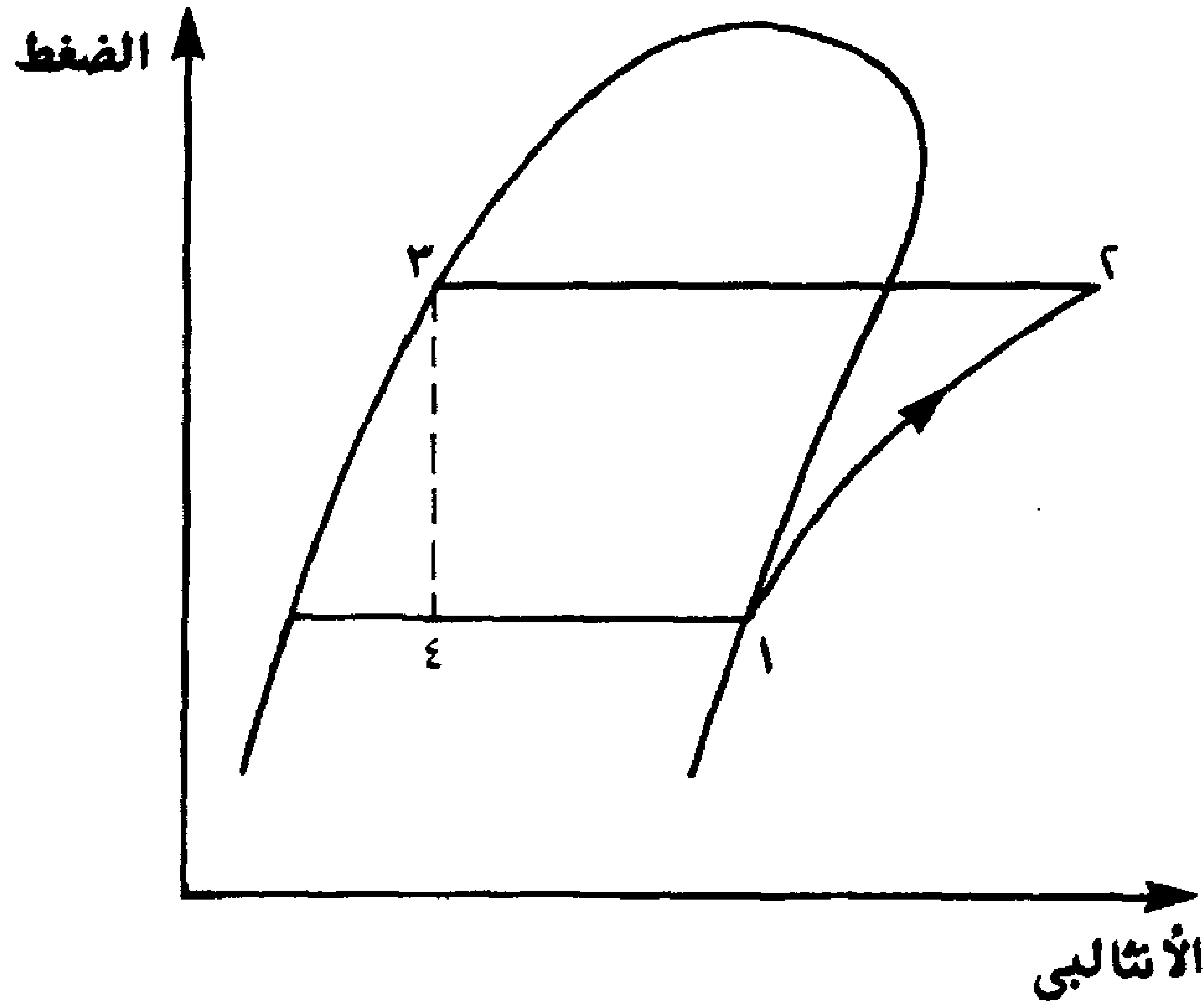
$$\dot{W} = \dot{m}\frac{n}{n-1}P_b v_b\left[r_p^{(n-1)/n} - 1\right] \qquad (13.8)$$

ويعتمد أداء دورة التبريد إلى حد كبير على أداء الضاغط الذي هو أحد المكونات الأساسية لدورة التبريد. ويقصد عادة بأداء الضاغط تغير معدل سريان كتلة المبرد خلال الضاغط والقدرة اللازمة لانضغاط المبرد مع تغير ظروف تشغيل الضاغط. ولقد فضل الكثير من مصنعي الضواغط استبدال معدل سريان الكتلة خلال الضاغط بسعة التبريد التي تتناسب طرديًا مع معدل سريان الكتلة. وبفرض أن الضاغط يعمل بدائرة تبريد مثالية كالمبينة على خريطة الضغط الإنثالبي بشكل ١٣,٥ فإن سعة تبريد الضاغط $\dot{Z}$ تُعطى عندئذ كما يلي:

$$\dot{Z} = \dot{m}(h_1 - h_2) \qquad (13.9)$$

وبالتعويض عن قيمة $\dot{m}$ بدلالة الكفاءة الحجمية ينتج أن:

$$\dot{Z} = \frac{1}{v_1}\overline{\mathrm{PD}}\left(1 + C - C\,\mathrm{r_p^{1/n}}\right)(h_1 - h_2) \qquad (13.10)$$



شكل ١٣,٥ دورة تبريد بسيطة.

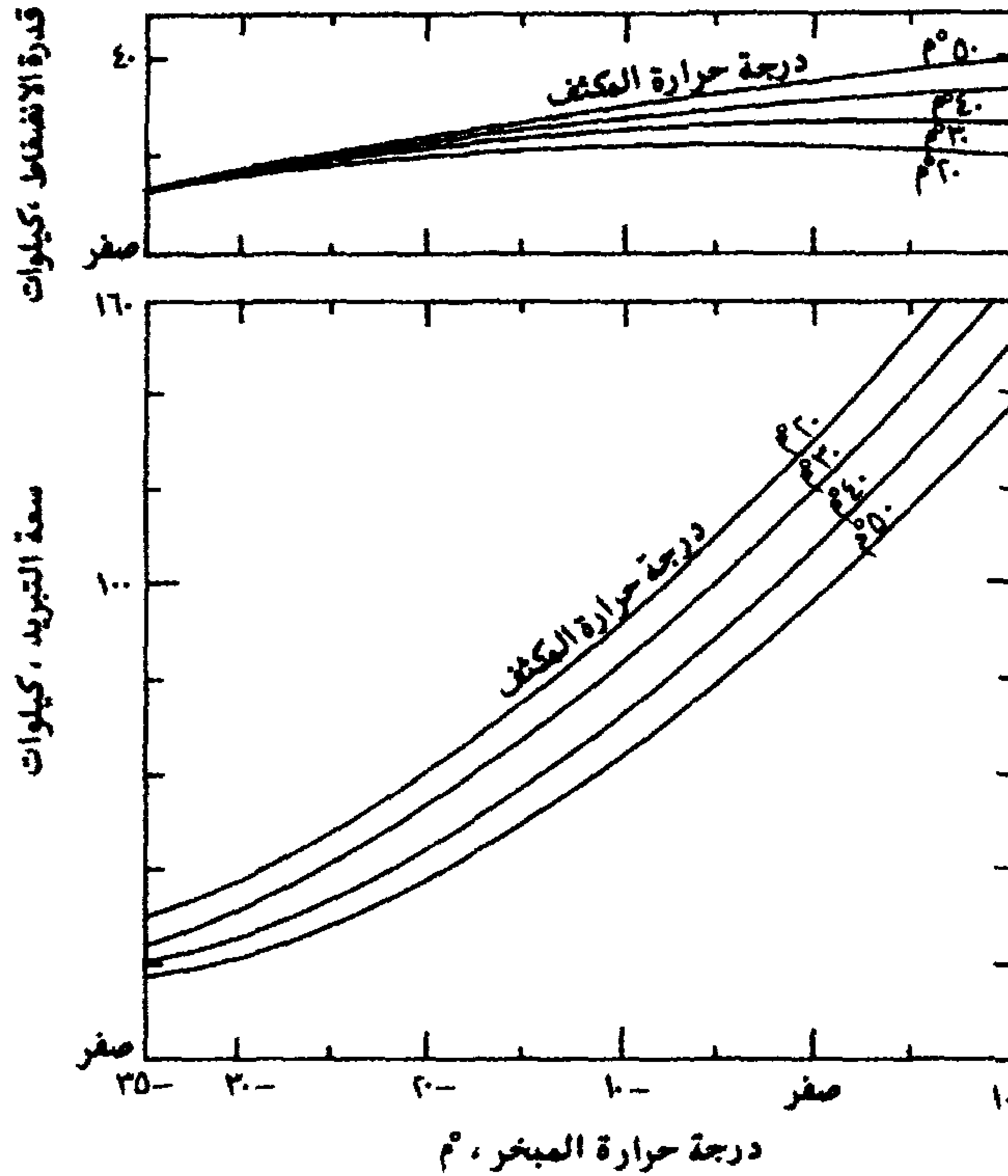
ويبين شكل ١٣,٦ تغير كل من سعة التبريد وقدرة الانضغاط لأحد الضواغط الترددية مع درجتي حرارة المبخر والمكثف لمبرد ٢٢. ويمثل الشكل حالة نمطية للمبردات الأخرى وباستخدام ضواغط أخرى، وذلك من حيث اتجاه المنحنيات بالشكل، دون القيمة العددية.

بمراجعة الشكل يمكن استنتاج الآتي عن أداء الضواغط الترددية:

أ) انخفاض سعة تبريد الضاغط بانخفاض درجة حرارة المبخر (ضغط السحب) و/أو ارتفاع درجة حرارة المكثف (ضغط الطرد).

ب) انخفاض قدرة الضاغط بانخفاض درجة حرارة المبخر (ضغط السحب) و/أو انخفاض درجة حرارة المكثف (ضغط الطرد).

ج) زيادة قدرة الانضغاط لكل وحدة سعة تبريد بانخفاض درجة حرارة المبخر و/أو ارتفاع حرارة المكثف.



شكل ١٣,٦ تغير سعة التبريد وقدرة الانضغاط لأحد الضواغط مع درجتي حرارة التشبع بالمكثف والمبخر لمبرد ٢٢ [Gosney 1982] .

أيضًا تعطى قدرة الانضغاط بالضاغط كما يلي:

$$\dot{W} = \overline{\mathrm{PD}}\left(1 + C - C\, r_p^{1/n}\right)\frac{n}{n-1} P_b \left[r_p^{(n-1)/n} - 1\right] \qquad (13.11)$$

ونظرًا للبند ج عاليه يفضل وجود طريقة تحكم لسعة تبريد الضاغط لتقليل قدرة الانضغاط لكل وحدة سعة تبريد عند انخفاض سعة التبريد بدورة

التبريد. وهناك عدة تقنيات للتحكم في سعة تبريد الضاغط الترددي. ولمزيد من التفاصيل حول هذا الموضوع يمكن الرجوع إلى [السيد ١٩٩٣].

مثال ١٣,١

يتكون ضاغط ترددي فردي الفعل من ٤ أسطوانات قطر كل منها الداخلي ٩٢مم، وبطول مشوار قدره ٦٧مم. يعمل الضاغط بسرعة دوران ١٤٥٠ لفة/دقيقة بين درجتي حرارة تشبع بالمبخر والمكثف قدرهما -١٠°م و ٥٠°م على التوالي. افرض أن الانضغاط أيزنتروبي وأن الضاغط يستخدم مبرد ٢٢، وأن نسبة حجم الخلوص هي ٣٪، وأن بخار المبرد يخرج من الضاغط عند حالة التشبع. أيضا افرض ١٠ كيلو بسكال فقد ضغط في صمام السحب وصمام الطرد، و٥°م تسخين في مشوار السحب بأسطوانة الضاغط.

أ) احسب إزاحة الكباس النظرية والفعلية.

ب) احسب الكفاءة الحجمية للضاغط.

ج) احسب معدل كتلة المبرد التي يناولها الضاغط.

الحل

أ) تعطى إزاحة الكباس النظرية كما يلي:

$$\overline{\text{PD}} = \frac{1}{60} * \frac{\pi}{4}(0.092)^2 * 0.067 * 4 * 1450 \quad \text{m}^3/s$$

من ملحق (أ) لخواص مبرد ٢٢ نجد أن ضغط المبخر المناظر لدرجة حرارة -١٠°م هو ٣٥٤,٨ كيلوبسكال مطلق وضغط المكثف المناظر لدرجة حرارة ٥٠°م هو ١٩٤٢,٧ كيلوبسكال مطلق، وتكون نسبة الانضغاط r_p مساوية ٥,٤٨. من شكل ١٣,٣ نجد أن قيمة γ لمبرد ٢٢ هي ١,١٢، وتحسب إزاحة الكباس الفعلية كما يلي:

$$\overline{PD}_a = 0.043 * \{1 + 0.03 - 0.03 * (5.48)^{1/1.12}\} = 0.0384 \quad m^3/s$$

ب) من خريطة مبرد ٢٢ في ملحق (أ) نجد أن قيمة v_1 و v_b تعطى كما يلي:

$$v_1 = 0.06527 \quad m^3/kg$$

$$v_b = 0.0071 \quad m^3/kg$$

وتحسب الكفاءة الحجمية كما يلي:

$$\eta_v = \frac{0.065}{0.071}\left\{1 + 0.03 - 0.03\left\{\frac{1942.7 + 10}{354.8 - 10}\right\}^{1/1.12}\right\} = 0.814$$

ج) يحسب معدل الكتلة التي يناولها الضاغط كما يلي:

$$\dot{m} = \frac{1}{0.065} \times 0.043 \times 0.814 = 0.54 \ kg/s$$

١٣,٣ الضواغط اللولبية

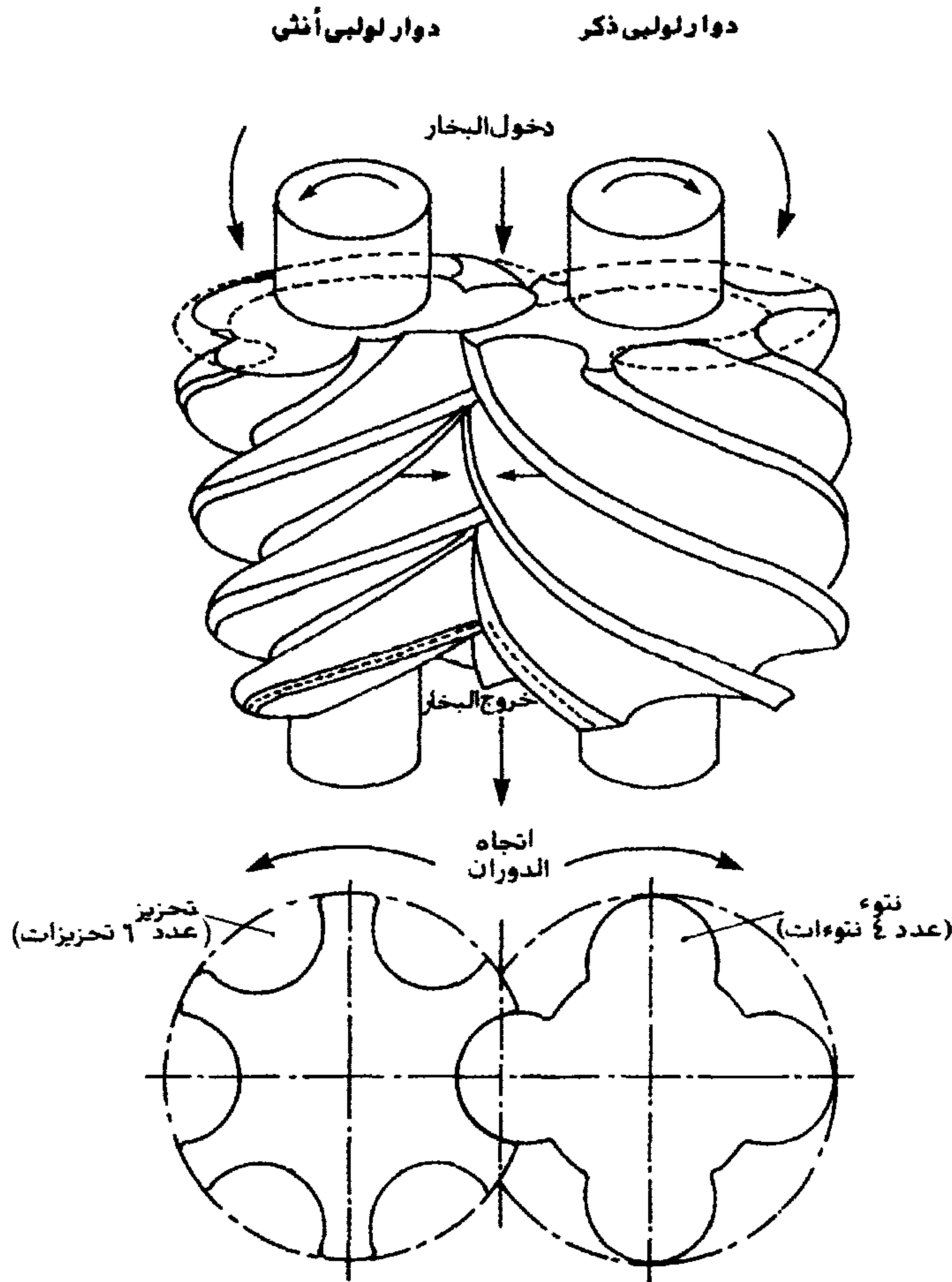
١٣,٣,١ طريقة العمل

الضواغط اللولبية هي ضواغط موجبة الإزاحة. ولقد دخلت الضواغط اللولبية صناعة التبريد وتكييف الهواء بعد عام ١٩٦٠م. ومنذ ذلك التاريخ تطورت صناعة هذه الضواغط تطورًا كبيرًا وشهدت العديد من التغيرات في تصميمها. وتمتاز هذه الضواغط بالسهولة في التصميم والتشغيل وقوة تحملها وطول عمرها وصغر حجمها وارتفاع كفاءتها بالمقارنة بالضواغط الترددية. وتتوفر الضواغط اللولبية بسعات تبريد أكبر من ٧٠ كيلووات (حوالي ٢٠ طن تبريد) وحتى ٦٤٠٠ كيلووات (حوالي ١٣٠٠ طن تبريد). وتعمل الضواغط

اللولبية بنسبة انضغاط (نسبة ضغط الطرد إلى ضغط السحب) مرتفعة نسبيًا تصل إلى حوالي ١:٢٥ مما يؤهلها للاستخدام كمرحلة واحدة بنظم التبريد منخفضة درجة الحرارة، بدلاً من استخدام مرحلتين أو أكثر من الضواغط.

يتكون الضاغط اللولبي من المكونات الأساسية الآتية: دوار لولبي ذكر، ودوار لولبي أنثى، وأسطوانة حاوية للدوارين، ووصلة سحب بخار المبرد إلى الضاغط، ووصلة طرد بخار المبرد إلى خط الطرد، وذلك بالإضافة إلى أجهزة الأمان والتحكم الأخرى. ويبين شكل ١٣,٧ رسمًا تخطيطيًا لأحد هذه الضواغط مبينًا مكوناته. وكما هو مبين يتكون الدوار اللولبي الذكر من عمود أسطواني به نتوءات مستديرة حلزونية، أما الدوار اللولبي الأنثى فهو عبارة عن عمود أسطواني به تجاويف (أو تحازيز) مستديرة حلزونية، وبدوران الدوار الذكر يتم تعشيق نتوءاته في تجاويف الدوار الأنثى مسببًا دورانه هو الآخر. كما هو مبين بالشكل أيضًا يدخل بخار المبرد من وصلة السحب ويملأ الفراغات بين الدوارين والأسطوانة الخارجية، وبدوران الدوار الذكر ومن ثم دوران الدوار الأنثى، يزاح بخار المبرد بين الدوارين والأسطوانة إلى الأمام، حيث يقل الحجم، مما يسبب انضغاط بخار المبرد. وينتقل بخار المبرد تدريجيًا في اتجاه وصلة الطرد، حيث يدفع إلى خارج هذه الوصلة عند ضغط الطرد. وتصمم الضواغط الدورانية باختلاف عدد النتوءات بالدوار الذكر عن عدد التجاويف (التحزيرات) بالدوار الأنثى وهى عادة ٤ في الأول و٦ في الثاني.

ويتضح من فكرة تشغيل الضاغط اللولبي أن هذا الضاغط له نسبة انضغاط ثابتة تعتمد على نسبة التغير في الحجم بين السحب والطرد بالضاغط. كما يتضح أيضًا أن عملية السحب والطرد هنا تتم بطريقة مستمرة وليس بطريقة متقطعة كما هو الحال في الضاغط الترددي، مما يساعد على خفض الاهتزاز والضوضاء بالضاغط اللولبي بالمقارنة بالضاغط الترددي.



شكل ١٣,٧ رسم تخطيطي لفكرة تشغيل الضاغط اللولبي.

يُدرس أداء الضواغط اللولبية بنفس الطريقة التي يُدرس بها أداء الضواغط الترددية. ويلزم لدراسة الضواغط اللولبية أن يحدد أولاً إزاحة الكباس بالضاغط وكفاءته الحجمية. عندئذ يمكن حساب تغير سعة تبريد الضاغط وقدرة الانضغاط اللازمة له بتغير ظروف التشغيل المختلفة مثل درجتي حرارة التشبع بالمبخر والمكثف.

١٣,٣,٢ إزاحة الكباس

وبفرض أن الدوارين الذكر والأنثى يعملان معًا ككباس، فإن إزاحة الكباس تقدر عندئذ بمعدل الحجم الذي يزيحه الكباس من ضغط السحب إلى ضغط الطرد، مقاسًا عند ضغط السحب. فإذا كان عدد النتوءات بالدوار الذكر هو ٤ وكان يدور بسرعة N ، وكان عدد التجويفات بالدوار الأنثى ٦ فإن سرعة دورانه تصبح ثلثي القيمة N. وبأخذ مقطع الضاغط عند وصلة السحب به وقبل بدء عملية انضغاط البخار، فإن مساحة المقطع المملوء بالبخار بين أي نتوئين بالدوار الذكر وسطح الأسطوانة الحاوية هو a_m، وكذلك مساحة المقطع المملوء بالبخار بين أي تجويف بالدوار الأنثى وسطح الأسطوانة الحاوية هو a_f، كما هو مبين بشكل ١٣,٧. عندئذ تعطى إزاحة الكباس النظرية كما يلي:

$$\overline{\mathrm{PD}}=L(4a_m N+6a_f.\frac{2}{3}N) \qquad (13.12)$$

حيث L هي طول أي من الدوارين. وتؤول العلاقة السابقة إلى الآتي:

$$\overline{\mathrm{PD}}=4LN(a_m+a_f) \qquad (13.13)$$

فإذا كان قطر أي من الدوارين (نفس القطر لكل منهما) هو D فإن إزاحة الكباس تصبح

$$\overline{\mathrm{PD}}=K\frac{\pi}{4}D^2LN \qquad (13.14)$$

حيث K معامل يعطى كما يلي:

$$K=\frac{4(a_m+a_f)}{(\pi/4)D^2} \qquad (13.15)$$

وهى تمثل النسبة بين مساحة المقطع بالضاغط اللولبي المملوءة بالبخار قبل عملية الانضغاط إلى هذه المساحة بضاغط ترددي له نفس قطر الكباس D. عندئذ تعطى الإزاحة الفعلية للضاغط اللولبي بالصورة الآتية :

$$\overline{\mathrm{PD}} = K\,\overline{\mathrm{PD}_r} \qquad (13.16)$$

حيث $\overline{\mathrm{PD}_r}$ هي إزاحة الكباس بضاغط ترددي له نفس القطر D ونفس طول المشوار L ونفس سرعة الدوران N . ويأخذ المعامل K عادة القيمة ٠,٦٢ .

١٣,٣,٣ الكفاءة الحجمية

تعرف الكفاءة الحجمية للضاغط اللولبي بنفس التعريف المستخدم في الضاغط الترددي. وعليه تعطى الكفاءة الحجمية للضاغط اللولبي كما يلي:

$$\eta_v = \frac{v_1}{v_b}(1 + C - C r_p^{1/n}) \qquad (13.17)$$

حيث v_1 و v_b هما الحجم النوعي خارج وصلة السحب وداخل الضاغط قبل عملية السحب، على التوالي. وتعرف C في المعادلة السابقة بأنها نسبة حجم الخلوص في نهاية عملية الانضغاط إلى إزاحة الكباس بالضاغط، وتعرف n بأنها المعامل البوليتروبي لعملية الانضغاط. ونلاحظ أن قيمة v_1 تساوي تقريبًا v_b لانخفاض قيمة فقد الضغط في وصلة السحب بالضاغط اللولبي بالمقارنة بهذا الفقد في الضاغط الترددي. أيضا تتضاءل قيمة C بالضاغط اللولبي بالمقارنة بالضاغط الترددي، ولهذا السبب تكون الكفاءة الحجمية للضاغط اللولبي أعلى بكثير منها للضاغط الترددي، ولا تنخفض هذه الكفاءة كثيرًا، (كما هو الحال بالضاغط الترددي)، عند ارتفاع نسبة الانضغاط r_b بالضاغط (مرة

أخرى لصغر قيمة C). ويقدر معدل الكتلة التي تبادلها الضاغط اللولبي بنفس المعادلة المستخدمة مع الضاغط الترددي، أي معادلة (13.6).

تعمل الضواغط اللولبية بنسبة انضغاط ثابتة، فإذا كانت عملية الانضغاط بوليتروبية بمؤشر n ، وكان حجم البخار المسحوب V_s أو بمعدل حجم $\overline{\mathrm{PD}}$ تبعًا لتعريف إزاحة الكباس لضاغط اللولبي، وضغطه P_s وكان الحجم في نهاية عملية الانضغاط V_d ، فإن ضغط الطرد داخل الضاغط يكون عندئذ كما يلي:

$$\frac{P_d}{P_s} = \left(\frac{V_s}{V_d}\right)^n = \varphi^n \qquad (13.18)$$

حيث ϕ هي نسبة الحجم عند بداية عملية الانضغاط إلى الحجم عند نهاية العملية. وتحسب القدرة اللازمة للانضغاط عندئذ كما يلي:

$$\dot{W} = \frac{n}{n-1} P_s \overline{\mathrm{PD}} \left\{ \left(r_p\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right\} \qquad (13.19)$$

حيث r_b هي نسبة انضغاط الضاغط، أي النسبة بين P_d و P_s. فإذا كانت العملية أيزنتروبية، يستخدم المؤشر الايزنتروبي γ بدلاً من المؤشر البوليتروبي n في العلاقة السابقة. ويعتمد ضغط السحب بالضاغط P_s على ضغط المبخر P_1، حيث يتساوى الضغطان في القيمة. أما ضغط الطرد من الضاغط P_d فيعتمد أساسًا على نسبة الحجمين في بداية ونهاية عملية الانضغاط، وهي تعتمد بدورها على الأبعاد الهندسية للضاغط وطريقة تصميمه، وقد يختلف هذا الضغط بالتالي عن الضغط بخط الطرد خارج الضاغط والمساوي لضغط المكثف P_2 تبعًا لظروف تشغيل نظام التبريد. وهذا الاختلاف بين P_d وP_2 يؤثر على قيمة القدرة $\dot{W}$، والمعطاة سابقًا في حالة تساوي P_d و P_2 فقط. وعليه تكون القدرة

اللازمة لعملية الانضغاط عند أي قيمة لضغط الطرد P_d الضاغط كما يلي [السيد ١٩٩٣]:

$$\dot{W} = \frac{n}{n-1} P_1 \overline{\text{PD}} \left[\varphi^{n-1} - 1\right] + P_1 \overline{\text{PD}} \varphi^{n-1} \left[\frac{P_2/P_1}{\varphi^n} - 1\right] \qquad (13.20)$$

١٣,٣,٤ الكفاءة الأيزنتروبية

وتقدر الكفاءة الأيزنتروبية للضاغط بدلالة القدرة السابقة كما يلي:

$$\eta_{isen} = \frac{\dot{m}(h_2 - h_1)}{\dot{W}} \qquad (13.21)$$

حيث h_1 و h_2 هي إنثالبي البخار خارج الضاغط بخط السحب والطرد على التوالي لعملية انضغاط أيزنتروبية من الحالة ١ بخط السحب إلى الحالة ٢ بخط الطرد، و $\dot{m}$ هي معدل سريان بخار المبرد. وتؤول المعادلة السابقة إلى الآتي:

$$\eta_{isen} = \frac{\frac{\gamma}{\gamma-1}[(\frac{P_2}{P_1})^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1]}{\frac{n}{n-1}[\phi^{(n-1)} - 1] + \phi^{n-1}[\frac{P_2/P_1}{\phi^n} - 1]} \qquad (13.22)$$

حيث h_1 و h_2 هما على التوالي الضغط بخط السحب وبخط الطرد.

مثال ١٣,٢

يعمل ضاغط لولبي ثنائي القلاووظ بين درجتي حرارة مبخر ومكثف قدرهما −٣٠ و٥٠°م على التوالي، مستخدمًا مبرد ٢٢، وبالمواصفات الآتية: قطر دوار قدره ١٥سم، وطول مشوار قدره ١٢سم، وسرعة دوران قدرها ٣٥٠٠ لفة/دقيقة، ومعامل نسبة مساحة مقطع K قدره ٠,٦، ونسبة حجم خلوص

قدرها ٠,٠١، ونسبة حجم في بداية الانضغاط إلى الحجم في نهاية الانضغاط قدرها ٥. افرض عملية انضغاط بوليتروبية بمؤشر n قدره ١,٢٠، احسب الآتي:

أ) إزاحة الكباس للضاغط.

ب) الكفاءة الحجمية للضاغط .

ج) قدرة التشغيل.

د) الكفاءة الأيزنتروبية لعملية الانضغاط.

هـ) سعة التبريد لدورة تبريد بسيطة تعمل بهذا الضاغط.

و) معامل أداء دورة التبريد.

الحل

أ) باستخدام معطيات المثال تقدر إزاحة الكباس كما يلي:

$$\overline{\mathrm{PD}} = 0.6 * \frac{\pi}{4} * (0.15)^2 * 0.12 * \frac{3500}{60} = 0.0742 \quad \mathrm{m}^3 / s$$

ب) يمكن إيجاد نسبة الضغط العالي إلى الضغط المنخفض r_p

$$r_p = \frac{P_d}{P_s} = \left(\frac{V_s}{V_d}\right)^n = (5)^{1.2} = 6.9$$

ج) وبإهمال التغير في الحجم النوعي لبخار المبرد قبل وبعد عملية السحب تقدر الكفاءة الحجمية كما يلي:

$$\eta_v = 1 + 0.01 - 0.01(6.9)^{1/1.2} = 0.96$$

د) من ملحق أ لمبرد ٢٢ نجد أن ضغط المبخر P_1 هو ١٦٣,٩ كيلوبسكال وضغط المكثف هو ١٩٤٢,٧ كيلوبسكال. وبأخذ قيمة n

مساوية ١,٢ كما هو معطى بالمثال فإن قدرة التشغيل تعطى كما يلي:

$$\dot{W} = \frac{1.20}{1.20-1} * 163.9 * 0.0742(5^{0.2} - 1) +$$
$$163.9 * 0.0742 * 5^{0.2}(\frac{1943.2}{163.9 * 5^{1.2}} 1-) = 39.76 \quad kW$$

هـ) بفرض دائرة تبريد بسيطة كالموضحة بشكل ١٣,٥، ومن ملحق أ نجد أن الإنثالبي h_1 بخط السحب تساوي ٣٩٢,٧ كيلوجول/كجم، وإنثالبي الخروج من الضاغط h_2 بخط الطرد تساوي ٤٥٧ كيلوجول/كجم، وإنثالبي الخروج من المكثف h_3 تساوي ٢٦٣ كيلوجول/كجم، وحجم البخار النوعي v_1 بخط سحب الضاغط يساوي ٠,١٣٥ م^{٣}/كجم. عندئذ يحسب معدل الكتلة $\dot{m}$ التي يناولها الضاغط كما يلي:

$$\dot{m} = \frac{1}{0.135} \times 0.0742 \times 0.96 = 0.528 \quad kg/s$$

وتكون قدرة التشغيل لعملية أيزنتروبية كما يلي:

$$\dot{W}_{isen} = \dot{m}(h_2 - h_1) = 0.528(457 - 392.7) = 34 \quad kW$$

وتحسب الكفاءة الأيزنتروبية كما يلي:

$$\eta_{isen} = \frac{34}{39.76} = 0.86$$

و) تعطى سعة تبريد الدورة البسيطة كما يلي

$$\dot{Z} = \dot{m}(h_1 - h_3)$$
$$= 0.528(392.7 - 263) = 68.48\,kW$$

يقدر معامل أداء دورة التبريد البسيطة التي تعمل بالضاغط المعطى بهذا المثال كما يلي

$$COP=\frac{68.48}{39.76}=1.72$$

الرموز ومعانيها للفصل الثالث عشر

a_f	مساحة المقطع المملوء بالبخار في تجويف الدوار الأنثى [م٢]
a_m	مساحة المقطع المملوء بالبخار في تجويف الدوار الذكر [م٢]
C	نسبة الخلوص [–]
D	القطر [م]
h	الانثالبي [كجول/كجم]
I	عدد الفعل للضاغط [–]
K	النسبة بين إزاحة الكباس اللولبي والترددي
L	طول المشوار [م]
$\dot{m}$	معدل سريان الكتلة [كجم/ث]
N	عدد لفات الضاغط في الدقيقة [١/دقيقة]
n	أس العملية البولتروبية [–]
N_c	عدد الأسطوانات في الضاغط [–]
P_a	ضغط السحب [كيلو باسكال]
PD	إزاحة الكباس [م٣/ث]
PD_r	الإزاحة لكباس ترددي[م٣/ث]
P_d	ضغط الطرد [كيلو باسكال]
PD_a	الإزاحة الفعلية [م٣/ث]
P_s	ضغط السحب [باسكال]
r_p	نسبة ضغط الطرد إلى ضغط السحب [–]
v_1	الحجم النوعي عند السحب [م٣/كجم]
v_b	الحجم النوعي في نهاية مشوار السحب داخل الأسطوانة [م٣/كجم]
$\dot{W}$	القدرة [كيلو وات]
$\dot{Z}$	سعة الضاغط [كيلو وات]

الحروف الإغريقية

η_{isen} الكفاءة الايزنتروبية للضاغط [-]

η_v الكفاءة الحجمية [-]

φ نسبة الحجم عند بداية عملية الانضغاط إلى الحجم عند نهاية العملية

γ المؤشر الايزنتوبي (C_p/C_v) [-]

الفصل الرابع عشر

ملفات التبريد والمكثفات

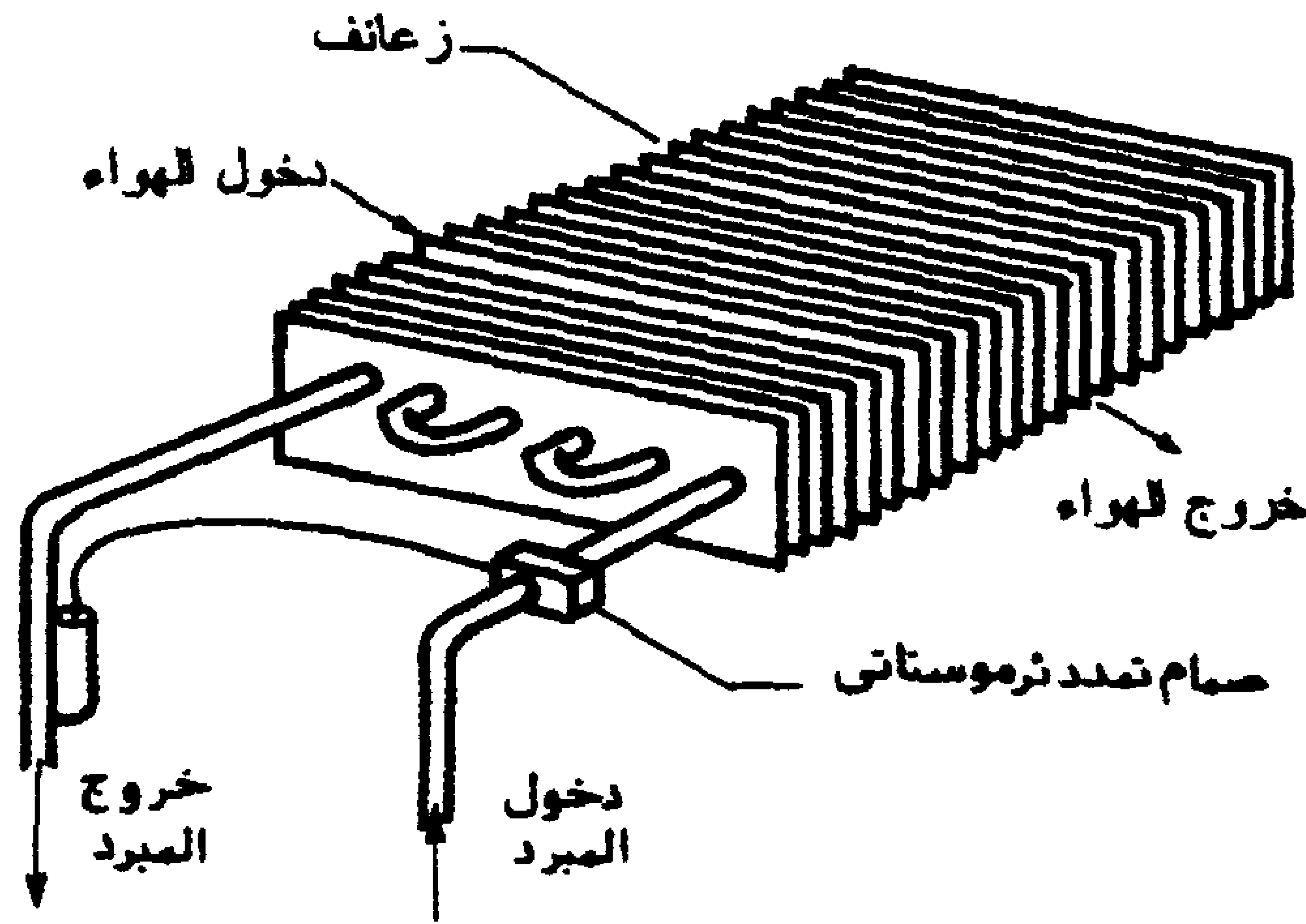
١٤,١ مقدمة

في الفصل الثاني قدمنا دورة التبريد المستخدمة في مخازن التبريد وعرضنا أساسيات تحليل هذه الدورة، وحساب الأحمال الحرارية الخاصة بالعمليات المختلفة بها. وفي الفصل الثامن قمنا بتقديم نظم التبريد الشائعة الاستخدام في مخازن التبريد وكيفية المفاضلة بين هذه النظم واختيارها في التطبيقات المتنوعة لمخازن التبريد. وبالطبع لا تعمل هذه النظم دون معدات تمثلها على أرض الواقع. ويتكون أي نظام تبرد من المكونات الأساسية الآتية: ملف تبريد، وضاغط، ومكثف، وصمام تمدد، وأنابيب ومواسير لتوصيل المكونات السابقة مع بعضها البعض، بالإضافة إلى العديد من أجهزة التحكم والقياس. فلقد تم عرض تصميم أنابيب ومواسير نقل المبرد بين المكونات المختلفة لنظم التبريد في الفصل التاسع. وقدمنا في الفصل العاشر صمامات التمدد ونظم وأجهزة التحكم الشائعة الاستخدام في نظم التبريد. وعرضنا لبعض أنواع الضواغط في الفصل الثالث عشر.

وفي الفصل الحالي نقدم عرضا موجزًا لباقي المعدات الأساسية التي لم نتعرض لها فيما سبق، وهي ملفات التبريد، والمكثفات. ويشمل العرض أهم أنواع هذه المعدات ومواصفاتها وأدائها. ونقدم أيضا في هذا الفصل كيفية اختيار هذه المعدات وإيجاد نقطة اتزانها عند العمل معًا، وكيفية اختيار المعدات اللازمة لتصميم مخازن التبريد.

١٤,٢ ملفات التبريد

تصنع ملفات التبريد بعدة تصميمات إلا أن أكثرها انتشارًا على الإطلاق هي ملفات التبريد مباشرة التمدد، أي ملفات التبريد التي يسري بها المبرد، فيتم تبخير هذا المبرد مباشرة بالحمل الحراري لملف التبريد. ويتكون هذا النوع من ملفات التبريد من أنابيب معدنية ذات زعانف (أسطح ممتدة) على سطحها الخارجي، كما هو مبين بشكل ١٤,١.



شكل ١٤,١ ملف تبريد مباشر.

يسري المبرد داخل الأنابيب ويسري الهواء خارجها فيتم تبريده بالزعانف. وتعتمد المسافة بين الزعانف وبعضها البعض على درجة حرارة الهواء المراد تبريده. فمثلا عند استخدام ملفات التبريد في غرف التبريد التي تعمل عند درجات حرارة أعلى من الصفر المئوي تؤخذ كثافة الزعانف لهذه الملفات من ٤٨٠ إلى ٥٦٠ زعنفة/متر. وبانخفاض درجة حرارة غرف التبريد يلزم الإقلال من كثافة الزعانف، نظرًا لتكون الصقيع (الجليد) الناتج عن تجمد الماء المكثف من بخار الماء بالهواء. لذا تؤخذ كثافة الزعانف حوالي ٢٤٠ زعنفة/متر في غرف التبريد التي تعمل عند درجة حرارة أقل من الصفر

المئوي، وتقل هذه الكثافة إلى حوالي ١٦٠ زعنفة/متر في تطبيقات درجة الحرارة المنخفضة. وتصنع الأنابيب عادة من النحاس، بينما تصنع الزعانف من الألمونيوم، إلا أن هناك بعض ملفات التبريد المصنوعة من أنابيب نحاس مع زعانف نحاس أو أنابيب ألومونيوم مع زعانف ألومونيوم [ASHRAE 1992].

تنتقل الحرارة بين ملفات التبريد وهواء الغرفة أما بالحمل الحر (أي الحمل الطبيعي) أو بالحمل القسري. ففي الطريقة الأولى يبرد الهواء الملامس لسطح ملف التبريد، فتزيد كثافته ويتجه إلى أسفل مسببًا حركة الهواء، مما يساعد على تحسين عملية التبريد. أما في الطريقة الثانية فتستخدم مروحة لدفع الهواء على سطح ملف التبريد، مما يحسن عملية تبريد الهواء إلى درجة تزيد بقدر كبير مقارنة بانتقال الحرارة بالحمل الحر.

يعتمد اختيار ملف التبريد بغرف التبريد على عدة عوامل أهمها الآتي:

أ) أن تكون سعة تبريد الملف مساوية لسعة التبريد المطلوبة.
ب) أن تصل درجة حرارة غرف التبريد إلى درجة التصميم.
ج) أن يكون أداء ملف التبريد اقتصاديًا عند ظروف التشغيل المختلفة.
د) أن تكون تكلفته الأولية في الحدود المسموح بها.
هـ) أن يكون حجمه ومواصفات أبعاده في حدود الحيز المتاح له بغرفة التبريد.

ويضاف إلى هذه العوامل الخمس السابقة عاملا سادسًا يعرف هذا العامل بفرق درجة المبخر، ويعطى له الرمز TD. وتعرف فرق درجة حرارة المبخر بأنها فرق درجات الحرارة بين الهواء الداخل إلى ملف التبريد (ويؤخذ عادة مماثلا لدرجة حرارة غرفة التبريد) ودرجة حرارة المبرد (أي درجة حرارة التشبع المناظرة لضغط المبخر) داخل ملف التبريد.

وتعتمد سعة تبريد ملف التبريد على فرق درجة حرارة المبخر، فتتغير سعة التبريد خطيًا مع TD، عند ثبات ظروف التشغيل الأخرى. فمثلا بزيادة قيمة فرق درجة حرارة المبخر من ٢ إلى ٤°م تزيد سعة التبريد إلى الضعف. لذا يجب اختيار أعلى قيمة ممكنة لفرق درجة حرارة المبخر لضمان توصيف ملف التبريد صغير السطح نسبيًا، وبالتالي مقبول التكلفة الأولية. إلا أن فرق درجة حرارة المبخر يؤثر مباشرة في الرطوبة النسبية للهواء الخارج من ملف التبريد، فبارتفاع قيمة TD تقل الرطوبة النسبية للهواء وبانخفاض قيمة TD تزيد قيمة الرطوبة النسبية. ويعزى هذا إلى اعتماد درجة حرارة سطح ملف التبريد على هذا الفرق، مما يعني انخفاض درجة حرارة هذا السطح بزيادة TD، وهذا بالضرورة يعني زيادة الفرق بين درجة حرارة سطح ملف التبريد ودرجة حرارة نقطة الندى للهواء الداخل إلى الملف، أي زيادة معدل تجفيف الهواء.

وبالطبع يؤثر انخفاض الرطوبة النسبية للهواء بغرف التبريد على الأغذية المخزونة بهذه الغرف نتيجة التجفيف الزائد، مما قد يؤدي إلى تلفها، أما ارتفاع الرطوبة النسبية فيؤدي إلى نمو الفطريات والبكتريا والعفن على سطح هذه الأغذية. لذا من الضروري حفظ الأغذية المكشوفة عند الرطوبة النسبية المثلى المناظرة لدرجة الحرارة المثلى. أما الأغذية المعلبة فلا يحتاج تخزينها إلى تحكم في الرطوبة النسبية.

ويوصي مصنعو ملفات التبريد بقيم محددة لدرجة حرارة المبخر في غرف التبريد للحصول على الرطوبة النسبية المطلوبة، وتعتمد هذه القيم على درجة حرارة الغرفة وكيفية انتقال الحرارة بين سطح الملف وهواء الغرفة، أي إن كان انتقال الحرارة بالحمل الحر أو بالحمل الطبيعي. ويبين جدول ١٤,١ القيم الموصى بها لفرق درجة حرارة المبخر عند ظروف تشغيل مختلفة [Dossat 1981].

جدول ١٤,١ القيم الموصى بها لفرق درجات الحرارة TD عند ظروف مختلفة للتشغيل [Dossat 1981].

الرطوبة النسبية	حمل حر	حمل قسري
٩١-٩٥	٧-٨	٤-٦
٨٦-٩٠	٨-٩	٦-٧
٨١-٨٥	٩-١٠	٧-٨
٧٦-٨٠	١٠-١١	٨-٩
٧٠-٧٥	١١-١٢	٩-١٠

يعتمد أداء ملف التبريد على مواصفته الهندسية بالإضافة إلى ظروف التشغيل الخارجية للملف. ويبين شكل ١٤,٢ خريطة أداء عدة ملفات تبريد بالتمدد المباشر باستخدام مبردات ١٣٤أ و ٢٢ و ٤٠٤أ عند ظروف تشغيل مختلفة، كما هي معطاة بإحدى الشركات المصنعة لملفات التبريد [شركة لو- في LU-VE]. وتعرف الرموز بالشكل كما يلي:

TC هي درجة حرارة غرفة التبريد.

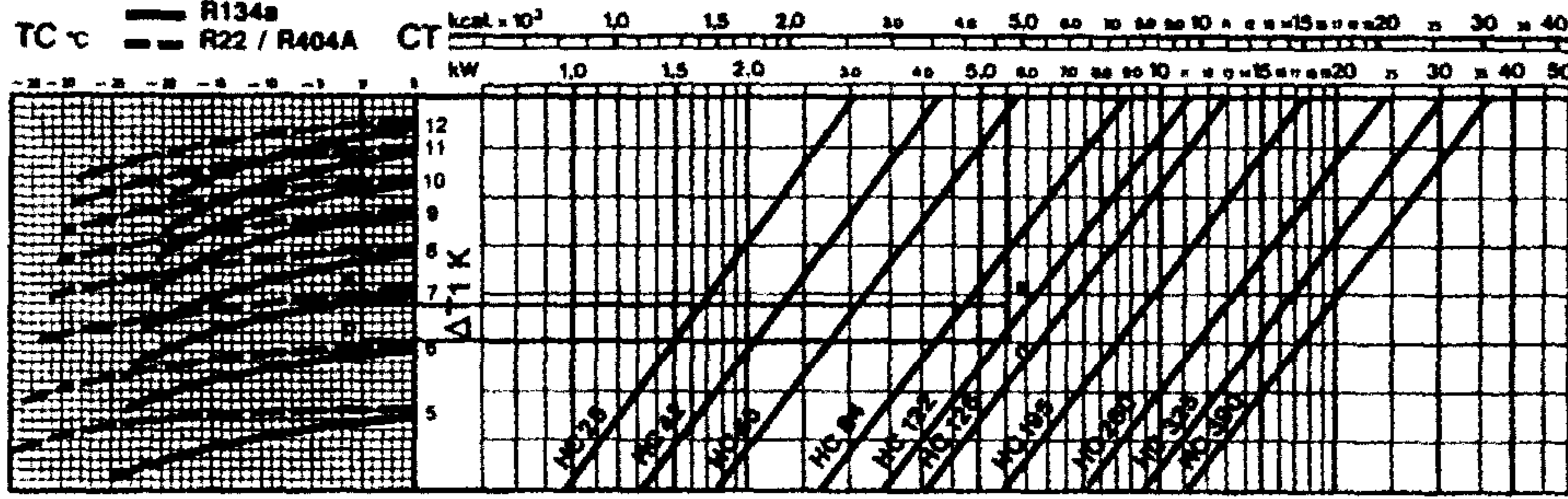
CT الحمل الحراري بغرفة التبريد .

$\Delta T1$ فرق درجة حرارة المبخر (وقد عرفناها سابقا بالرمز TD) ، أي الفرق بين درجة حرارة دخول الهواء إلى ملف التبريد ودرجة حرارة المبرد داخل ملف التبريد.

ويبين المثال التالي طريقة استخدام شكل ١٤,٢ لاختيار ملف تبريد.

مثال ١٤,١

اختر ملف تبريد من شكل ١٤,٢ للعمل في غرفة تبريد عند درجة صفر مئوي ورطوبة نسبية قدرها ٨٥٪ إذا كان حمل التبريد للغرفة هو ٥٥٠٠ وات. استخدم مبرد ١٣٤أ.



شكل ١٤,٢ مثال لأداء بعض ملفات التبريد شركة [LU-VE].

الحل

من جدول ١٤,١ وبفرض حمل قسري، تكون فرق درجة حرارة المبخر ٧°م. عند $\Delta T1$ تساوى ٧°م و TC تساوي صفر°م (درجة حرارة غرفة التبريد) وباستخدام مبرد ١٣٤أ توقع نقطة A على شكل ١٤,٢، كما هو موضح بالشكل. يمد خط أفقي ليتقاطع مع حمل تبريد ٥٥٠٠ وات عند النقطة B. ونلاحظ أنه لا يوجد أي ملف تبريد عند النقطة B لذا يتم اختيار الملف الأكبر عند النقطة C وهو ملف تبريد رقم HC122. من نقطة C نتجه يسارًا حتى نقطة التقاطع مع الخط الرأس لدرجة حرارة الغرفة عند صفر°م، وتكون نقط التقاطع هي النقطة D. من الشكل تكون فرق درجة حرارة المبخر عند النقطة D هو ٦,٣°م. عندئذ تكون درجة حرارة المبخر كما يلي:

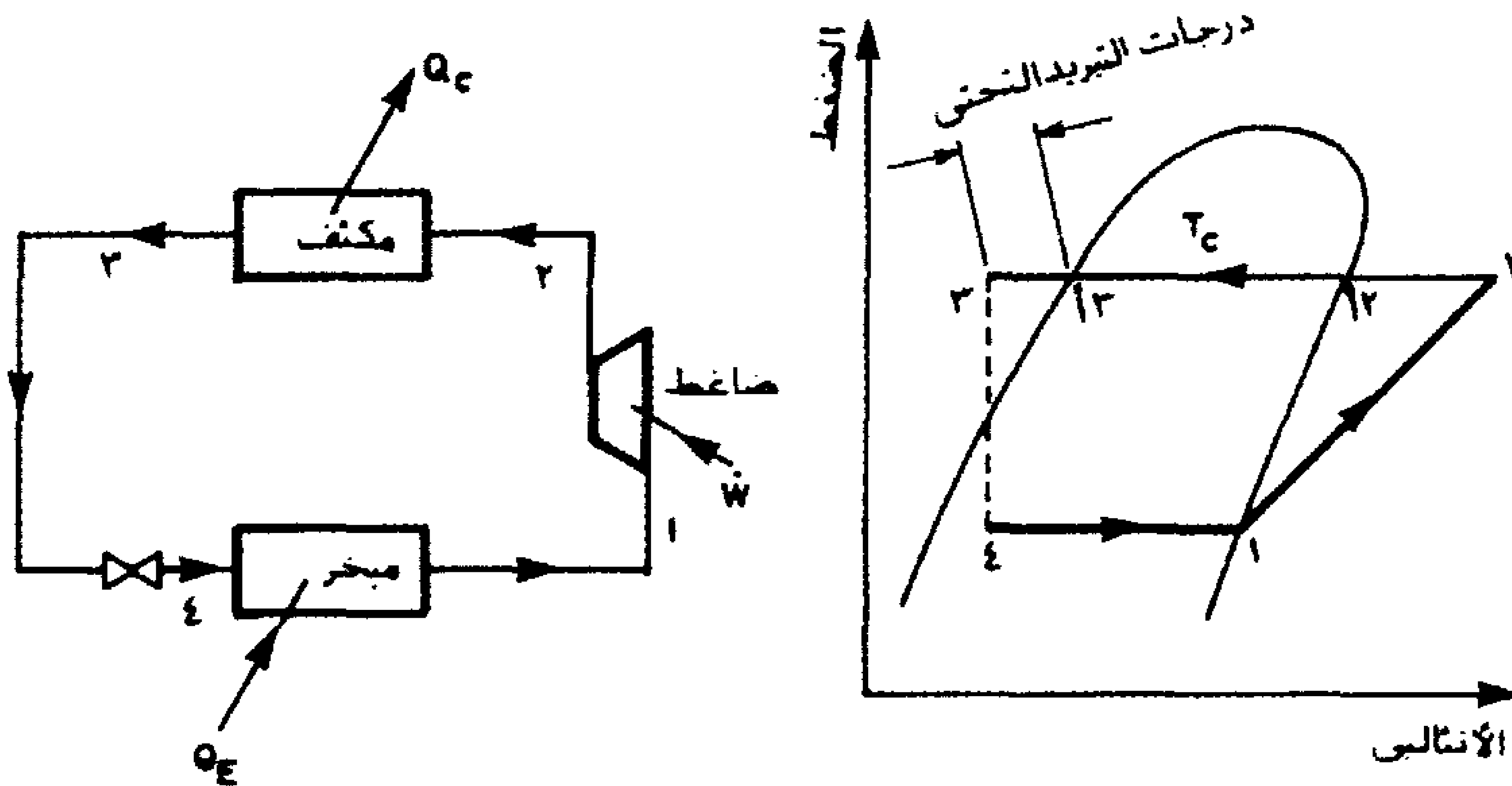
$$T_E = TC - \Delta T1 = 0 - 6.3 = -6.3 \ ^{\circ}C$$

ويكون الاختيار النهائي هو ملف تبريد موديل HC122 يعمل عند درجة حرارة مبخر قدرها – ٦,٣°م.

١٤,٣ المكثفات

المكثف هو أحد المكونات الأساسية لأي نظام تبريد، ففي المكثف يتم طرد الحرارة بالمعدل اللازم لضمان تشغيل دورة التبريد بالأداء الموصى به. تقسم المكثفات عمومًا، وتبعًا لطريقة طرد الحرارة بها، إلى مكثفات مبردة بالماء، ومكثفات مبردة بالهواء، ومكثفات تبخيرية مبردة بتبخير الماء بالإضافة إلى تبريدها بالهواء.

يمثل شكل ١٤,٣ رسمًا تخطيطيًا لدورة تبريد بسيطة مع تمثيلها على خريطة الضغط - الإنثالبي. وكما هو موضح بالرسم تتم عملية طرد الحرارة بالمكثف بين الحالتين ٢ و٣. ويقدر الحمل الحراري الداخلي (أي محسوبًا من السريان داخل المكثف) تبعًا لشكل ١٤,٣ كما يلي:



شكل ١٤,٣ دورة تبريد بسيطة.

$$\dot{Q}_c = \dot{m}(h_2 - h_3) \quad (14.1)$$

حيث $\dot{m}$ هي معدل سريان المبرد خلال المكثف و h هي إنثالبي المبرد. ويطرد الحمل الحراري $\dot{Q}_c$ من المكثف إلى الخارج بمائع إزالة حرارة يكون عادة ماء أو هواء أو كليهما (كالمكثفات التبخيرية).

عندئذ يعطى الحمل الحراري الخارجي للمكثف كما يلي:

$$\dot{Q}_c = UA\Delta T_m \qquad (14.2)$$

حيث U هي المعامل الكلي لانتقال الحرارة بين المبرد داخل المكثف ومائع إزالة الحرارة خارجه، و A هي مساحة انتقال الحرارة بالمكثف، و ΔT_m هي الفرق اللوغارتمي المؤثر لدرجات الحرارة بين المبرد داخل المكثف ومائع إزالة الحرارة خارجه. ويلزم عند ظروف الاستقرار أن يتساوى الحملان الحراريان الداخلي والخارجي المعطيان بالمعادلتين (14.1) و(14.2) على التوالي، فإذا لم يتساويا تغيرت ظروف تشغيل دورة التبريد حتى يتم هذا التساوي للحملين.

بالرجوع إلى معادلة (14.1) وشكل ١٤,٣ يتغير الحمل الحراري الداخلي للمكثف بتغير درجتي حرارة المبخر والمكثف نتيجة:

أ) تغير الإنثالبي عند الدخول والخروج إلى ومن المكثف.

ب) تغير معدل سريان المبرد خلال المكثف، حيث يتغير هذا المعدل مع درجتي حرارة المكثف والمبخر تبعًا لنوع الضاغط المستخدم في دورة التبريد.

ويبين الرسم على اليسار بشكل ١٤,٤ تغير الحمل الحراري الداخلي لأحد وحدات التبريد المستخدمة لمبرد ٢٢ وضاغط ترددي مغلق، مع درجتي حرارة المكثف والمبخر. ويلاحظ من الرسم انخفاض قيمة الحرارة المطرودة داخليًا من المبرد بالمكثف بانخفاض درجة حرارة المبخر و/أو ارتفاع درجة حرارة المكثف.

من معادلة ١٤,٢ يتغير الحمل الحراري الخارجي للمكثف بتغير درجة حرارة المكثف ودرجة حرارة مائع إزالة الحرارة من المكثف، اللتين تؤثران مباشرة في تغير ΔT_m. أيضًا يعتمد الحمل الحراري الخارجي للمكثف على حاصل الضرب UA للمكثف. ويبين الرسم إلى اليمين بشكل ١٤,٤ زيادة الحمل

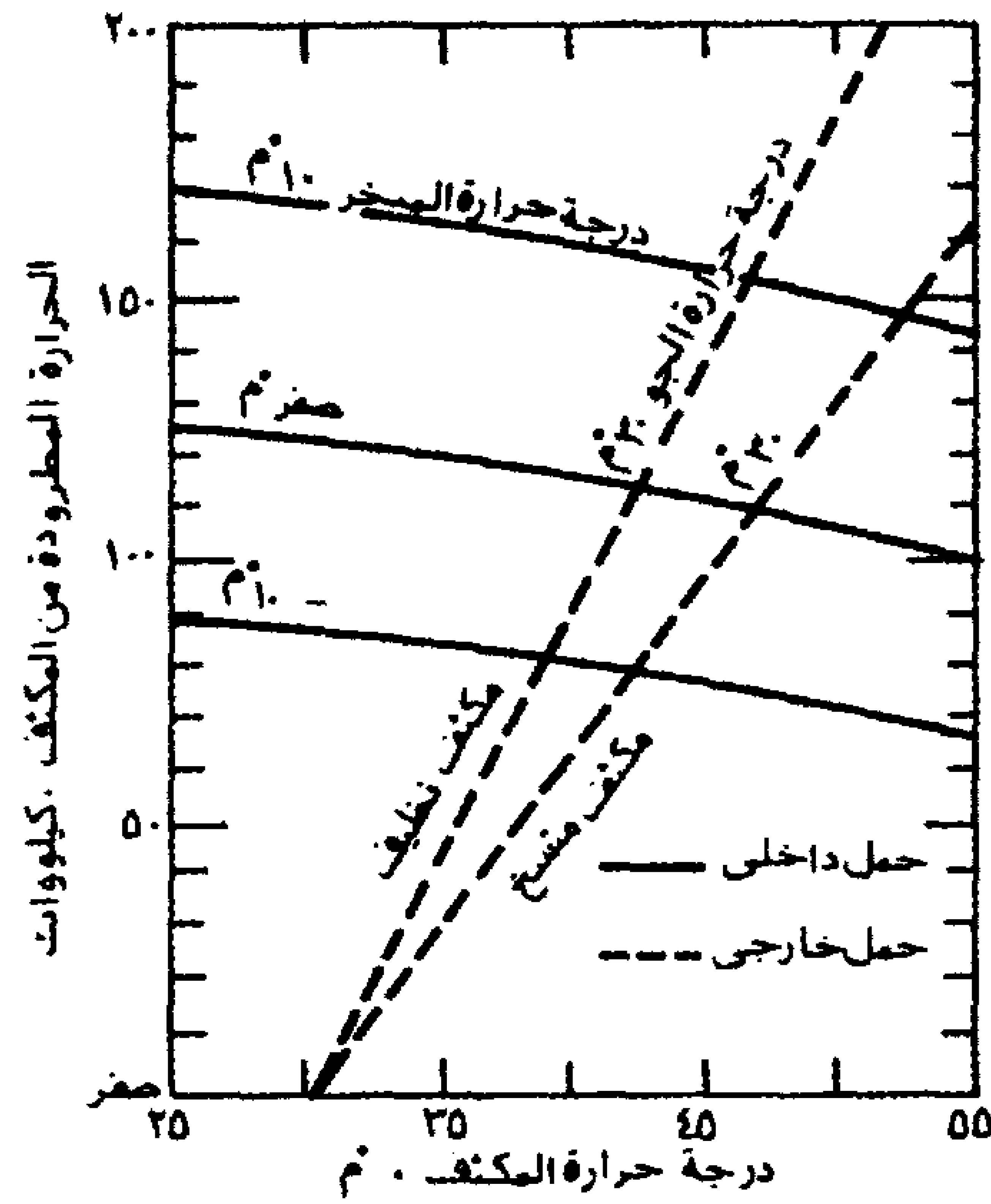
الحراري الخارجي لمكثف ما (مبرد بالهواء ويستخدم مبرد ٢٢) بارتفاع درجة حرارة المكثف و/أو انخفاض درجة حرارة الجو، عند ثبات قيمة UA.

وتحدد درجة حرارة المكثف بتساوي الحمل الحراري الداخلي والحمل الحراري الخارجي للمكثف عند ظروف التشغيل المختلفة. ويبين شكل ١٤,٥ ارتفاع درجة حرارة المكثف من ٣٨ إلى ٤٢,٥°م ثم إلى ٤٧°م إذا ارتفعت درجة حرارة المبخر من -١٠°م إلى صفر °م ثم إلى ١٠°م، إذا كان سطح المكثف نظيفاً. فإذا كان سطح المكثف متسخاً أصبحت درجة حرارة المكثف على التوالي هي ٤٢,٥ و ٤٧ و ٥٣°م. وتعزى هذه الزيادة في درجة حرارة المكثف إلى اتساخ سطحه، مما يخفض قيمة معامل انتقال الحرارة الكلي U بالمعادلة (14.2) ، وبالتالي يقل ميل خط الحمل الحراري الخارجي كما هو موضح بشكل ١٤,٥.

يفضل معظم مصممو نظم التبريد، التعبير عن الحمل الحراري للمكثف $\dot{Q}_c$ بدلالة حمل التبريد بالمبخر $\dot{Q}_E$. لذا يعرف معامل طرد الحرارة HRF كما يلي:

$$\text{HRF}=\frac{\dot{Q}_c}{\dot{Q}_E} \qquad (14.3)$$

ويتغير الحمل الحراري للمكثف وكذلك معامل طرد الحرارة (أي الحمل الحراري لكل وحدة تبريد) مع تغير درجة حرارة المبخر، وكذلك مع تغير درجة حرارة المكثف، فيزيد الحمل الحراري للمكثف، وكذلك يزيد معامل طرد الحرارة بانخفاض درجة حرارة المبخر، أو ارتفاع درجة حرارة المكثف، أو زيادة نسبة الانضغاط بالضاغط (أي نسبة ضغط المكثف إلى ضغط المبخر) كما هو مبين بشكل ١٤,٦ لأحد المبردات.

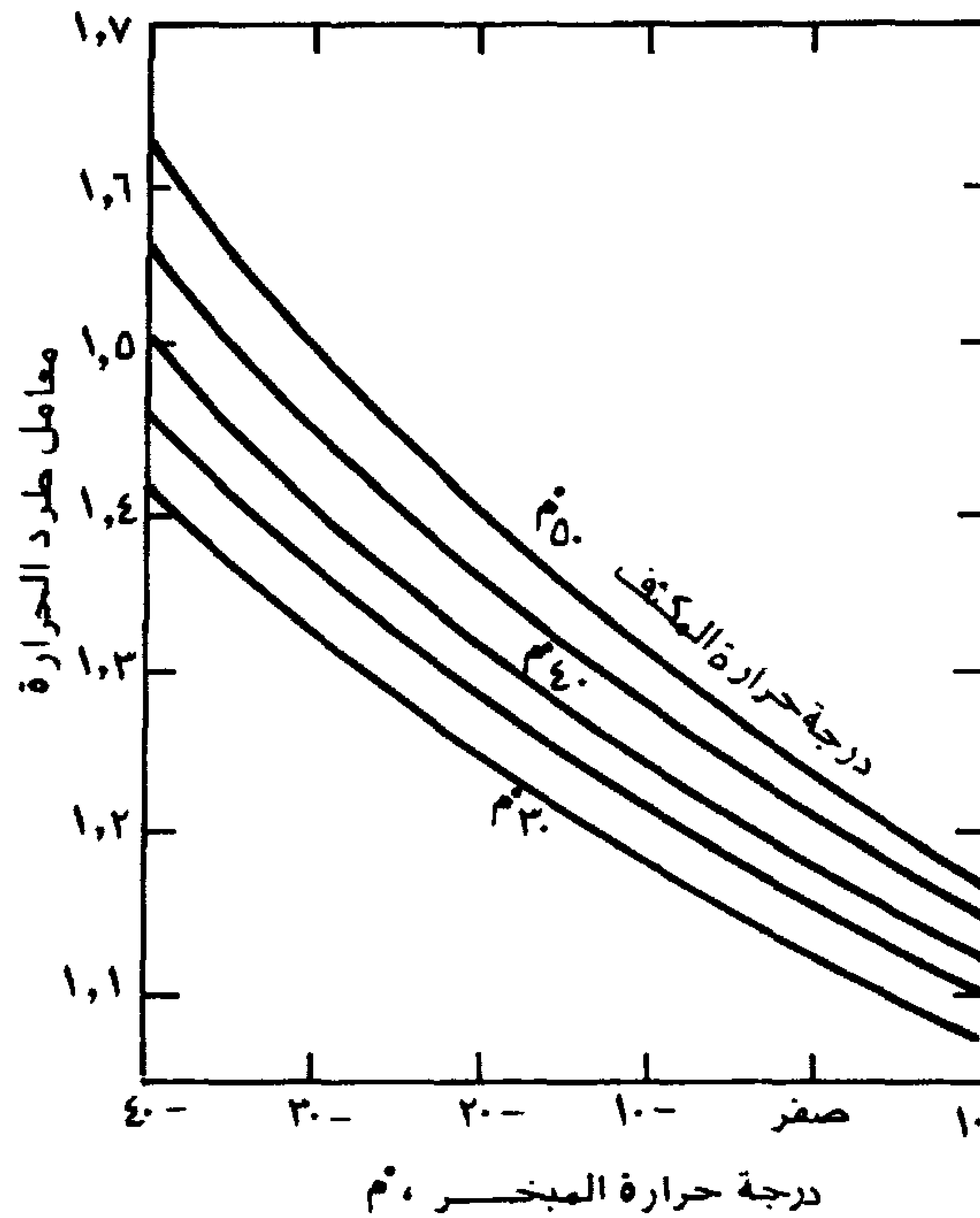


شكل ١٤,٥ درجة حرارة المكثف عند توازن الحمل الحراري الداخلي والحمل الحراري الخارجي لمكثف نظيف وآخر متسخ. البيانات بالخريطة لمكنة تبريد تستخدم مبرد ٢٢ مع ضاغط ترددي مغلق ومكثف مبرد بالهواء.

مثال ١٤,٢

تستخدم دورة تبريد بسيطة كالمبينة بشكل ١٤,٣ مبرد ٢٢ بين درجة حرارة مبخر قدرها -١٠°م ودرجة حرارة مكثف قدرها ٥٠°م. بفرض حالة تشبع لسائل المبرد عند الخروج، وحالة تشبع لخروج البخار من المبخر، وانضغاط أيزنتروبي بالضاغط. ادرس تغير معامل الحرارة لهذه الدورة مع:

أ) تغيير درجة حرارة المكثف بين ٣٠ إلى ٧٠°م.
ب) تغيير درجة حرارة المبخر بين -٣٠ و +١٠°م.
ج) تغير نسبة الانضغاط بالضاغط للحالتين أ و ب عاليه .



شكل ١٤,٦ تغير معامل طرد الحرارة مع درجة حرارة المبخر ودرجة حرارة المكثف لأحد المبردات [ASHRAE 1983].

الحل

يحسب معامل طرد الحرارة للدورة من معادلة (14.3) كما يلي (انظر شكل ١٤,٣)

$$\text{HRF}=\frac{\dot{Q}_c}{\dot{Q}_E}=\frac{h_2-h_3}{h_1-h_3}$$

تقدر قيمة الإنثالبي h من ملحق أ، ويبين جدول ١٤,٢ ملخص حسابات معامل طرد الحرارة عند قيم مختلفة لدرجة حرارة المكثف، وقيم مختلفة لدرجة حرارة المبخر، وقيم مختلفة لنسبة الانضغاط بالضاغط. ويتضح من الجدول الآتي:

- زيادة معامل طرد الحرارة بارتفاع درجة حرارة المكثف.
- زيادة معامل طرد الحرارة بانخفاض درجة حرارة المبخر.

• زيادة معامل طرد الحرارة بارتفاع قيمة نسبة الانضغاط بالضاغط. ويبين شكل ١٤,٧ هذا التغير عند ثبات درجة حرارة المكثف أو عند ثبات درجة حرارة المبخر.

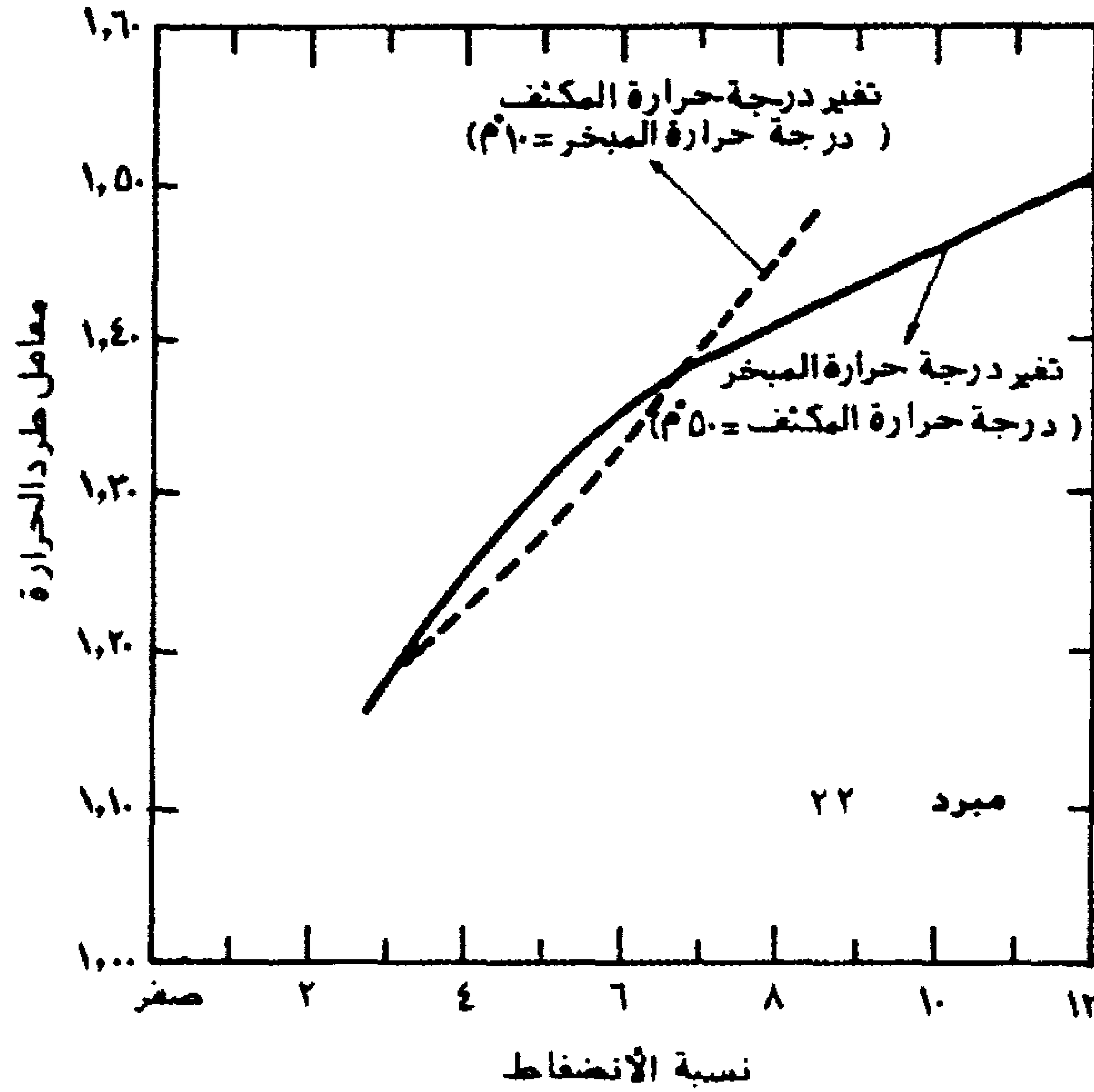
جدول ١٤,٢ مختصر حل مثال ١٤,٢.

درجة حرارة م°		الضغط كيلوباسكال			الانثالبي كيلوجول/كيلوجرام			معامل الحرارة
المكثف	المبخر	المكثف	المبخر	نسبة الانضغاط	h_1	h_2	h_3	HRF
٣٠	١٠-	١١٩١,٩	٣٥٤,٧٩	٣,٣٦	٤٠١,٢	٤٣١,٤	٢٣٦,٦	١,١٨
٤٠	١٠-	١٥٣٤,٠	٣٥٤,٧٩	٤,٣٢	٤٠١,٢	٤٣٨,١	٢٤٩,٦	١,٢٤
٥٠	١٠-	١٩٤٣,٢	٣٥٤,٧٩	٥,٤٨	٤٠١,٢	٤٤٤,٥	٢٦٣,٢	١,٣١
٦٠	١٠-	٢٤٢٧,٩	٣٥٤,٧٩	٦,٨٤	٤٠١,٢	٤٥٠,٧	٢٧٧,٦	١,٤
٧٠	١٠-	٢٩٩٧,٥	٣٥٤,٧٩	٨,٤٥	٤٠١,٢	٤٥٦,٦	٢٩٣,١	١,٥١
٥٠	٣٠-	١٩٤٢,٧	١٦٣,٠	١١,٨٥	٣٩٢,٧	٤٥٧,٣	٢٦٣,٢	١,٥٠
٥٠	٢٠-	١٩٤٢,٧	٢٤٥,٣	٧,٩٢	٣٩٧,١	٤٥٠,٥	٢٦٣,٢	١,٤٠
٥٠	١٠-	١٩٤٢,٧	٣٥٤,٧٩	٥,٤٨	٤٠١,٢	٤٥٠,٧	٢٦٣,٢	١,٣٠
٥٠	.	١٩٤٢,٧	٤٩٨,٠	٣,٩٠	٤٠٥,٠	٤٣٩,٣	٢٦٣,٢	١,٢٤
٥٠	١٠	١٩٤٢,٧	٦٨١,٠	٢,٨٥	٤٠٨,٦	٤٣٤,٥	٢٦٣,٢	١,١٨

ويلزم التنويه بالآتي:

• يمثل شكل ١٤,٧ علاقة نمطية لتغير معامل طرد الحرارة مع نسبة الانضغاط عند ظروف تشغيل مختلفة.

• يجب على المصمم اختيار أقل درجة حرارة ممكنة بالمكثف، وكذلك أعلى درجة حرارة ممكنة بالمبخر للمحافظة على معامل طرد حرارة منخفض، مما يعني صغر مساحة سطح انتقال الحرارة بالمكثف المطلوب اختياره.



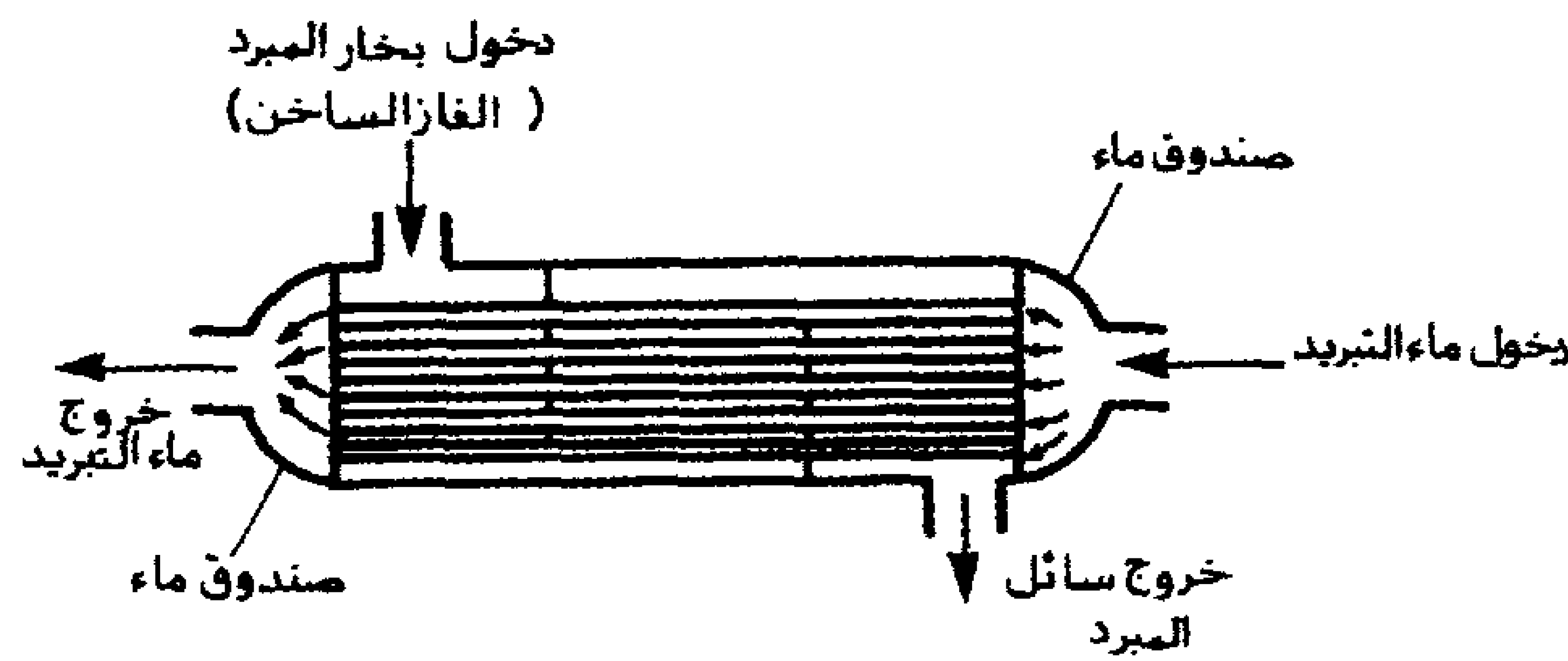
شكل ١٤,٧ تغير معامل طرد الحرارة مع نسبة الانضغاط لمثال ١٤,٢.

١٤,٤ المكثفات المبردة بالماء

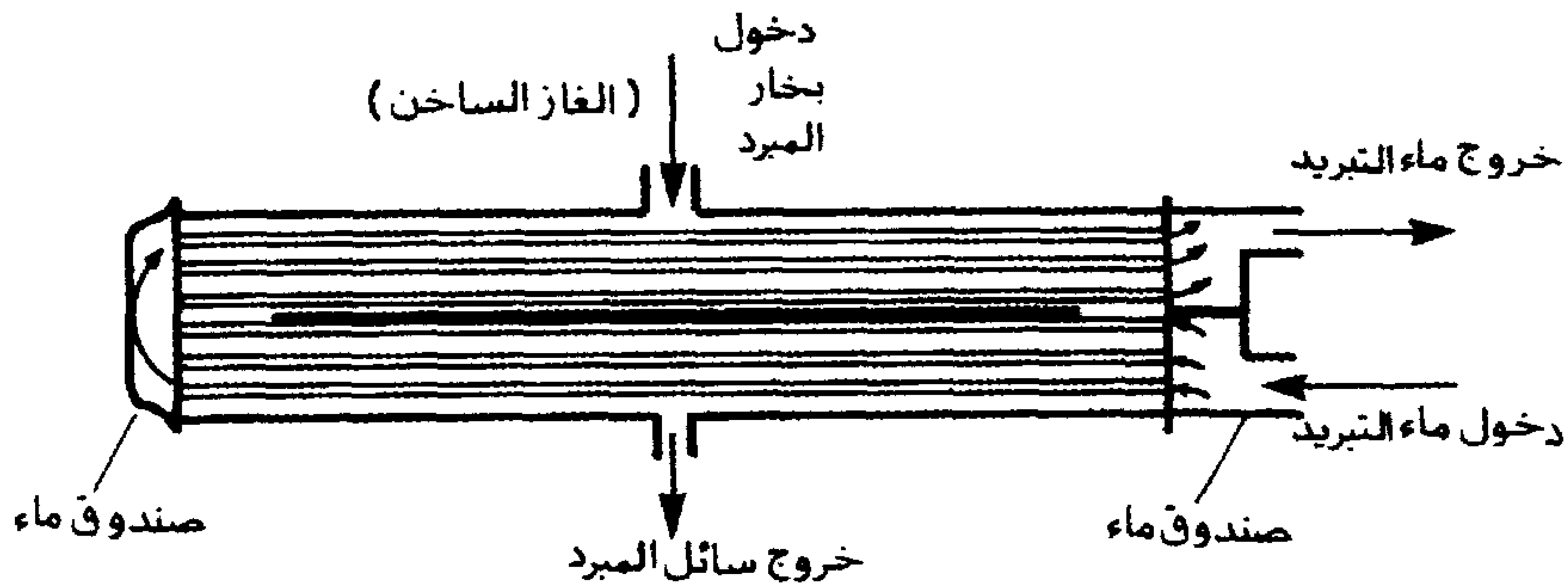
يعتبر مكثف الغلاف والأنبوب هو أكثر أنواع المكثفات المبردة بالماء انتشارًا. ويستخدم هذا المكثف في معظم تطبيقات التبريد لسعات تبريد من ١٢ كيلووات حتى أكثر من ٣٥,٠٠٠ كيلووات تبريد. ويتكون المكثف من غلاف به عدة أنابيب يسري داخلها ماء التبريد. ويدخل بخار المبرد إلى الغلاف من أعلى، حيث يتم التكثيف على السطح الخارجي للأنابيب، ويتساقط البخار المتكثف إلى قاع الغلاف، حيث يخرج سائل المبرد.

يصنف مكثف الغلاف والأنبوب تبعًا لعدد ممرات ماء التبريد بالمكثف، فيقال أن المكثف أحادي الممر لماء التبريد إذا سمح للماء بالمرور مرة واحدة فقط خلال جسم المكثف، كما هو موضح بالحالة "أ" بشكل ١٤,٨، أو ثنائي الممر للماء إذا سمح للماء بالمرور مرتين خلال جسم المكثف، كما هو موضح بالحالة

"ب" بشكل ١٤,٨، وهكذا. وتستخدم بعض التطبيقات الجزء السفلي من الغلاف كمستقبل لسائل المبرد، مما ينفي الحاجة إلى مستقبل خارجي. ويمتاز هذا النوع من المكثفات بكفاءته لعملية انتقال الحرارة وتكثيف بخار المبرد، كما يمتاز أيضًا بسهولة تنظيف أنابيبه ميكانيكيًا بعد فك صندوقي الماء عند طرفي المكثف. ومن عيوب هذا المكثف ارتفاع تكلفته نسبيًا بالمقارنة بأنواع المكثفات الأخرى.



حالة (أ): مكثف أحادي الممر لماء التبريد.



حالة (ب): مكثف ثنائي الممر لماء التبريد.

شكل ١٤,٨ رسم تخطيطي لمكثف غلاف وأنبوب.

وتتوفر هذه المكثفات في صناعة التبريد بعدة مقاسات تبعًا للحمل الحراري المطلوب من المكثف. ويتراوح قطر الغلاف الأسطواني الشكل لهذه المكثفات بين ١٠سم إلى ١٥ مترًا، وتستخدم أنابيب نحاس بقطر قدره من ١٦مم إلى ٥٠مم عادة (نظم هالوكربونات)، أو أنابيب صلب بقطر خارجي قدره ٣١,٧٥مم عادة (نظم الأمونيا). كما يتراوح طول أنابيب هذه المكثفات عادة

بين متر إلى ٦,٥ مترًا، بعدد أنابيب يتراوح بين ٦ إلى أكثر من ١٠٠٠ أنبوب [ASHRAE 1988].

وتحوي بعض أنواع هذه المكثفات عددًا أضافيًا من الأنابيب في الجزء السفلي من الغلاف للمساعدة على التبريد التحتي (التبريد الدوني) لسائل المبرد قبل الخروج من المكثف. ويعتمد عدد هذه الأنابيب على درجة التبريد التحتي المطلوبة بالمكثف، ودرجة حرارة دخول ماء التبريد إلى المكثف ومعدل سريانه. أيضًا قد يحوي السطح الخارجي للأنابيب زعانف (أسطح ممتدة) لتحسين عملية انتقال الحرارة عند استخدام نظم الهالوكربونات، ويلفت النظر إلى مراعاة ألا تزيد شحنة المبرد بهذا النوع من المكثفات التي تعمل أيضًا كمستقبل عن حد السماح، حيث يعمل ارتفاع مستوى سائل المبرد بغلاف المكثف على إعاقة عملية انتقال الحرارة لتكثيف بخار المبرد، مما يؤدي إلى ارتفاع الضغط بالمكثف.

وتعتمد درجة حرارة المكثف على درجة حرارة الماء الداخل إلى المكثف، وكذلك على معدل سريان الماء. فتنخفض هذه الدرجة بانخفاض درجة حرارة الماء الداخل للمكثف و/أو زيادة معدل سريان الماء. وتؤخذ عادة درجة حرارة المكثف أعلى من درجة حرارة الماء الخارج منه بحوالي ٤ إلى ٥°م. كذلك يؤخذ عادة فرق درجتي حرارة الماء الداخل إلى المكثف والخارج منه حوالي من ٣ إلى ٦°م تبعًا لمعدل سريان الماء إلى المكثف. ويحدد معدل سريان الماء إلى المكثف تبعًا للموازنة بين: تحسين عملية انتقال الحرارة (بزيادة سرعة الماء) بين ماء التبريد والمبرد داخل المكثف، ومنع الترسيب (بزيادة سرعة الماء) داخل أنابيب المكثف، وخفض تكلفة ضخ الماء (بخفض معدل سريانه)، وتآكل أنابيب المكثف الناتج عن السرعات العالية لسريان الماء. ويؤخذ عادة معدل سريان الماء إلى المكثف حوالي ٠,٠٢٥ لتر/ث لكل كيلووات تبريد في نظم إهدار الماء، وحوالي من ٠,٠٤ إلى ٠,٠٦ لتر/ث لكل كيلووات تبريد في

نظم إعادة استخدام ماء التبريد (نظم أبراج التبريد)، [Dossat 1981&Harris 1983].

يسري ماء التبريد داخل أنابيب المكثف ويحمل هذا الماء، تبعًا لدرجة نقاوته ونوعيته، بعضًا من المواد الصلبة العالقة به بالإضافة إلى العديد من الأملاح المذابة به، وبمرور الزمن تبدأ عملية الترسيب وتكوين القشور على سطح انتقال الحرارة، وحتى في أنقى أنواع المياه تتم عملية تكوين القشور هذه، ولكن بمعدلات بطيئة. وتعمل القشور المترسبة على تكوين طبقة عازلة حراريًا، مما يؤدي إلى خفض معامل انتقال الحرارة، وبالتالي انخفاض الحمل الحراري المطرود من المكثف. وتعتبر أملاح كربونات الكالسيوم هي أول القشور المترسبة على أسطح المكثف، حيث تكون درجة الحرارة بها مرتفعة نسبيًا، مما يساعد على ترسيب هذه القشور. وينصح عادة باستخدام معالجة كيميائية مستمرة لماء التبريد، وذلك باستخدام مضخة خاصة لحقن كيميائيات إلى هذا الماء. وتعمل هذه الكيميائيات على تأخير عملية الترسيب دون منعها كلية، أو إلى جعل القشور المترسبة لينة يسهل إزالتها، أو لكلا الغرضين. كما ينصح عادة للتقليل من تكوين القشور على سطح المكثف المحافظة على ماء التبريد قلويًا بدرجة بسيطة بأن يكون الأس الهيدروجيني له حوالي من ٧ إلى ٧,٥. ويعطي مصنعو المكثفات أداء مكثفاتهم لأسطح انتقال حرارة نظيفة نسبيًا، مع قيمة سماح صغيرة لمقاومة الاتساخ. لذا يلزم عند التشغيل، التنظيف الدوري لسطح المكثف من جهة سريان الماء للمحافظة على كفاءة عملية انتقال الحرارة عند قيمة مرتفعة، مما يحسن أداء وحدة التبريد. وتنظف أنابيب المكثف أما ميكانيكيًا باستخدام فرش خاصة لهذا الغرض مصنعة من الصلب لمواسير الصلب، ومن البلاستيك لمواسير النحاس، وأما باستخدام كيمائيات تتفاعل مع القشور ثم يتم غسلها قبل التشغيل مرة أخرى.

١٤,٥ المكثفات المبردة بالهواء

نظرًا لتوفر الهواء مقارنة بالماء، فإن المكثفات المبردة بالهواء تلاقي قبولا كبيرًا لمعظم التطبيقات المختلفة لهندسة التبريد. يمرر المبرد في هذا النوع من المكثفات داخل أنابيب المكثف بينما يمرر الهواء الجوي المحيط على السطح الخارجي لانتقال الحرارة بالمكثف. ونظرًا لصغر قيمة معامل انتقال الحرارة من جهة الهواء بالمقارنة بمعامل انتقال الحارة من جهة المبرد يفضل عادة استخدام أسطح ممتدة (زعانف) على سطح انتقال الحرارة من جهة الهواء (السطح الخارجي) لتحسين قيمة معامل انتقال الحرارة للمكثف.

وتصنع أنابيب المكثف لنظم الهالوكربونات عادة من أنابيب نحاس بقطر يتراوح بين ٦ إلى ٢٠ مم، ويركب عليها أسطح ممتدة (زعانف) من رقائق النحاس أو الألمنيوم، وإن كان الألمونيوم هو المستخدم في معظم الأحيان. وتصنع أنابيب مكثفات الأمونيا، وكذلك نظم الهالوكربونات في بعض الأحيان، من الصلب، نظرًا لتفاعل النحاس مع الأمونيا. عندئذ يجب معالجة الصلب لحمايته من العوامل الجوية خاصة إذا وضع المكثف في جو خارجي عالي الرطوبة. وتستخدم الأسطح الممتدة عادة بمسافات تتراوح بين ١,٤ إلى ٣,٢ مم بين هذه الأسطح وتزيد هذه المسافات في الأجواء المتربة وتقل كلما كان الهواء في منطقة عمل المكثف نظيفًا نسبيًا.

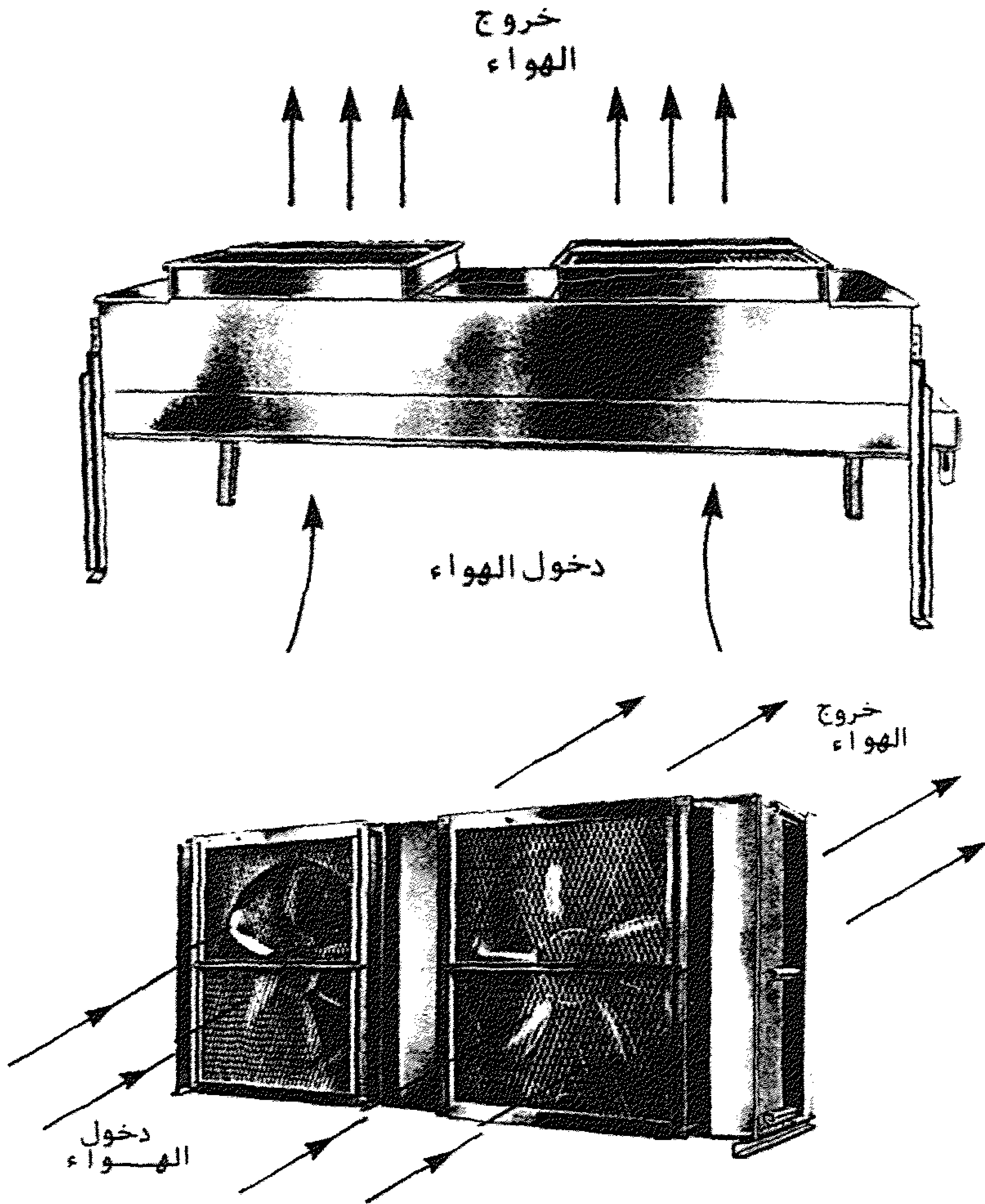
يتحسن معامل انتقال الحرارة في المكثفات المبردة بالهواء بزيادة معدل سريان الهواء خلال هذه المكثفات، مما يعني انخفاض درجة حرارة المكثف، وبالتالي انخفاض قدرة الانضغاط بالضاغط. هذا من ناحية، إلا أنه من ناحية أخرى، يزيد فقد الضغط لسريان الهواء خلال المكثف، مما يزيد من استهلاك قدرة تشغيل مروحة دفع الهواء. ويلزم للمصمم عندئذ حساب أفضل معدل سريان للهواء للموازنة بين تحسين انتقال الحرارة وزيادة فقد الضغط ويتراوح

معدل سريان الهواء الأمثل خلال المكثفات بحوالي من ٨٠ إلى ١٦٠ لتر/ث لكل كيلووات من الحمل الحراري بالمكثف.

وبالرجوع إلى معادلة انتقال الحمل الحراري خلال سطح المكثف، معادلة (14.2)، نجد أن هذا الحمل يعتمد على الفرق المؤثر لدرجات الحرارة بين المبرد والهواء. وبزيادة هذا الفرق، ترتفع درجة حرارة المكثف مما يعني زيادة قدرة الانضغاط بالضاغط بالإضافة إلى انخفاض التأثير التبريدي بالمبخر. ويلزم لخفض قيمة هذا الفرق زيادة معدل سريان الهواء خلال المكثف، أو تكبير مساحة سطح انتقال الحرارة بالمكثف، أو كليهما. وهذا يعني زيادة تكاليف التشغيل أو زيادة التكلفة الأولية أو كليهما معًا. ولقد أظهرت التصميمات وخبرات تشغيل المكثفات المبردة بالهواء أن القيمة المثلى للفرق المؤثر لدرجات الحرارة بين المبرد والهواء يجب أن تتراوح بين ٨ إلى ٢٢°م، تبعًا لظروف التشغيل للمكثف [ASHRAE 1998] .

تثبت المكثفات المبردة بالهواء عادة فوق الأسطح أو في منطقة خارجية مسورة، وإن كان يفضل وضعها فوق الأسطح في الأجواء المتربة حتى تكون بعيدة نسبيًا عن سطح الأرض، فتنخفض نسبة الأتربة بالجو المحيط بالمكثف. وتحفظ بعض هذه المكثفات- الصغيرة نسبيًا- في غرف الآلات بالمباني، ولكن يشترط تجديد هواء الغرف باستمرار، ولا ينصح بذلك إلا للمكثفات الصغيرة فقط. ويسري الهواء الخارجي بهذه المكثفات بواحد من نظامين: نظام أفقي أو نظام رأسي كما هو موضح بشكل ١٤,٩. في النظام الأفقي، يسري الهواء أفقيًا على أسطح انتقال الحرارة بالمكثف. ويتأثر نوع المكثفات الذي يعمل بهذه الطريقة باتجاه وشدة الريح، لذا ينصح بوضع عاكس ريح عند خروج الهواء من المكثف في المناطق شديدة سرعة الريح والمتغيرة الاتجاه. ويسري الهواء رأسيًا، في النظام الرأسي، خلال المكثف، ولا يعتمد هذا النظام كثيرًا على

سرعة واتجاه الريح. ويوجد نظام ثالث من المكثفات يسحب فيه الهواء أفقيًا ويخرج رأسيًا من أعلى المكثف.

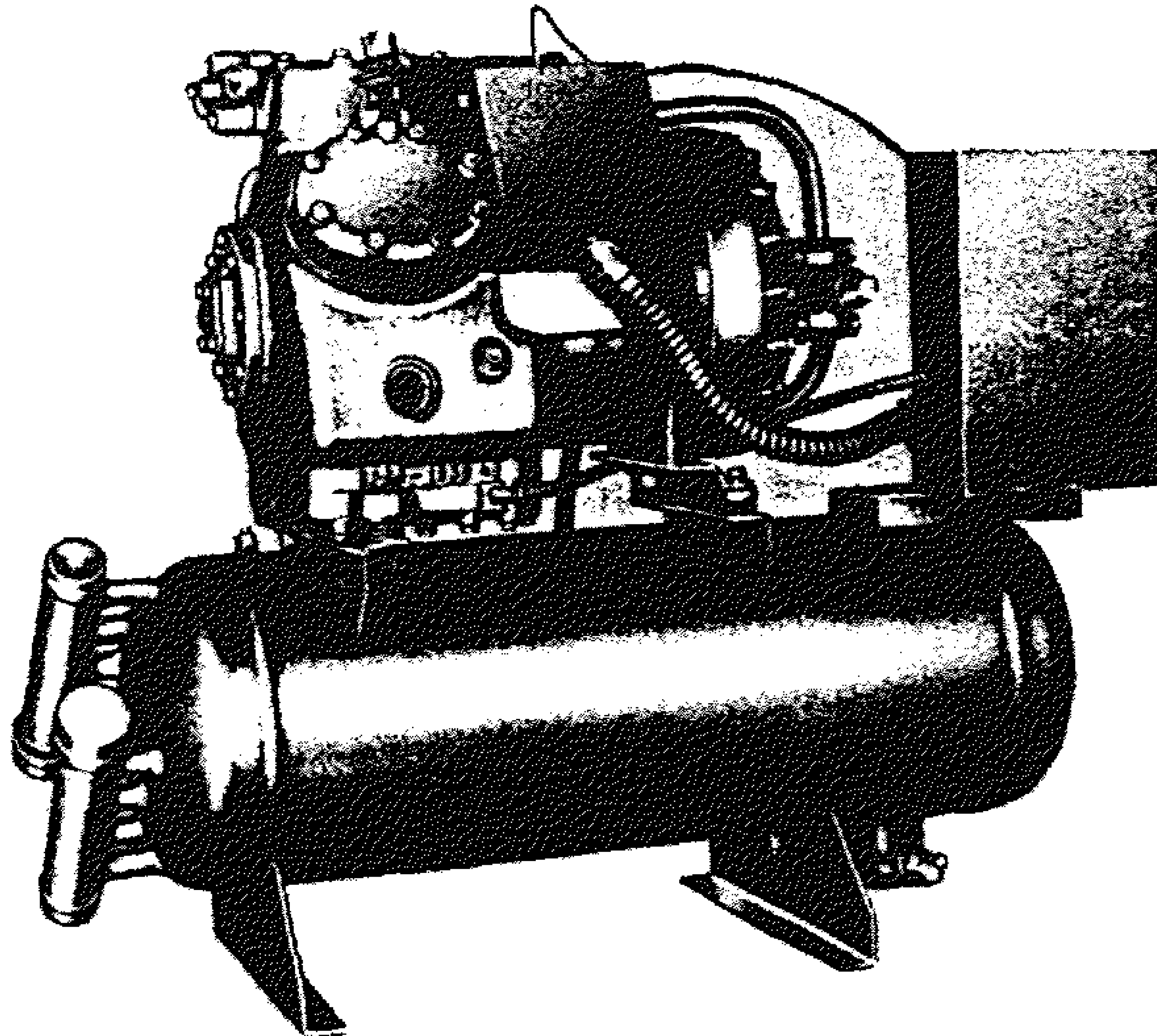


(الرسم العلوي لسريان هواء رأسي، والرسم السفلي لسريان هواء أفقي)

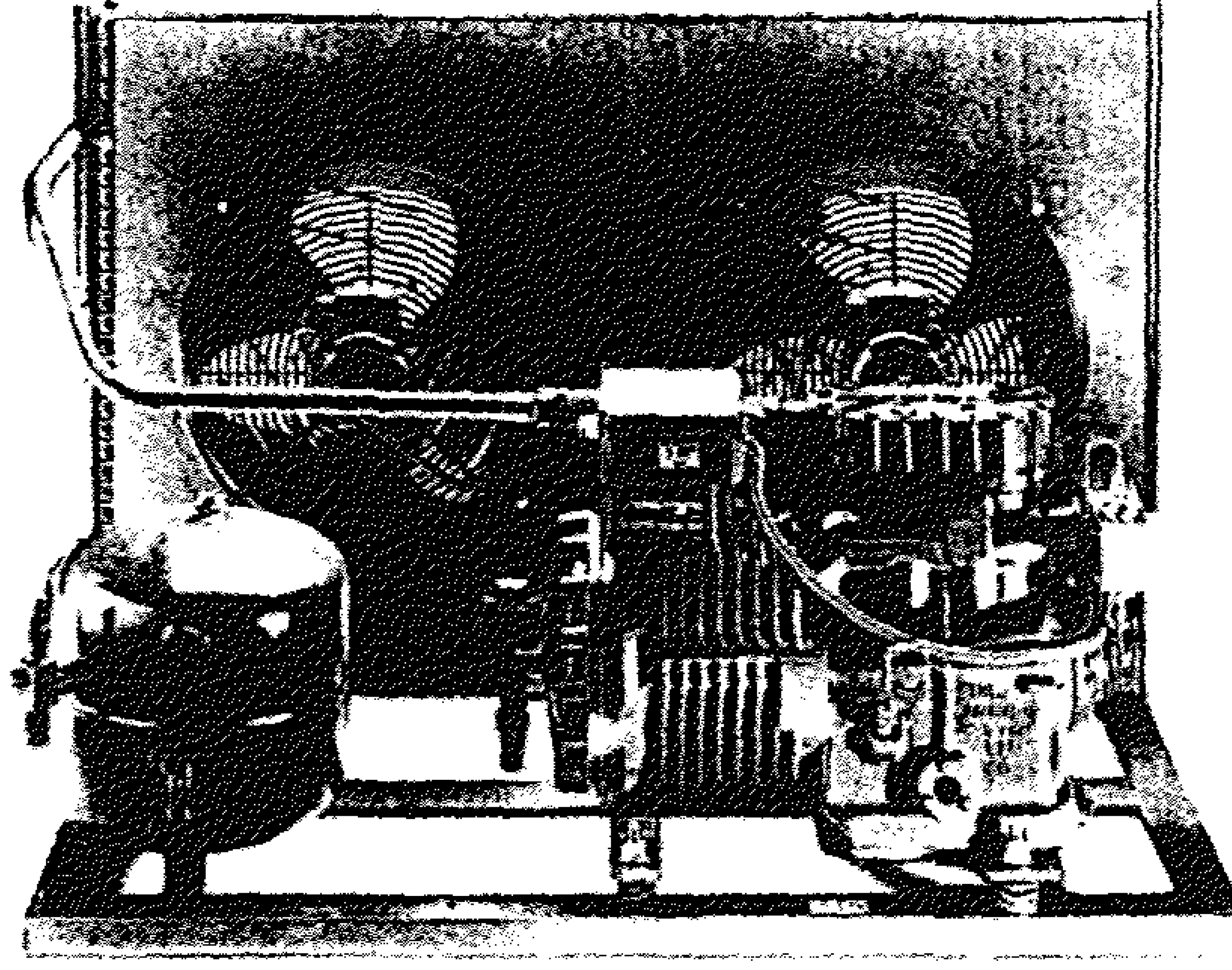
شكل ١٤,٩ رسم تخطيطي لمكثف مبرد بالهواء.

١٤,٦ وحدات التكثيف: الضاغط والمكثف

وحدات التكثيف هي وحدات سابقة التجميع، أي تم تجميعها بالمصنع، وتضم هذه الوحدات الضاغط والمكثف وأجهزة التحكم الخاصة بهما. وتقوم عدة شركات بتقديم هذه الوحدات للاستخدام مباشرة مع ملفات التبريد في التطبيقات المختلفة. وتضمن الشركات المصنعة توافق أداء الضاغط مع أداء المكثف بهذه الوحدات عند ظروف التشغيل المختلفة. وبالطبع يعتمد أداء هذه الوحدات على مواصفات الضاغط المستخدم وسعته، وكذلك مواصفات المكثف المستخدم بالوحدة وسعته. ويعتبر الضاغط الترددي هو أكثر الضواغط شيوعًا للعمل في وحدات التكثيف. وتتوفر وحدات التكثيف باستخدام مكثفات مبردة بالماء (انظر شكل ١٤,١٠) وكذلك مكثفات مبردة بالهواء (انظر شكل ١٤,١١).



شكل ١٤,١٠ وحدة تكثيف بها مكثف مبرد بالماء [كاريير Carrier] .



شكل ١٤,١١ وحدة تكثيف بها مكثف مبرد بالهواء [كوبلاند Copeland].

يُعَرف أداء وحدات التكثيف ذات المكثف المبرد بالماء بدلالة سعة التبريد التي تعطيها هذه الوحدات عند العمل بدرجات حرارة مختلفة بالمبخر والمكثف، بينما يُعَرف أداء وحدات التكثيف المبردة بالهواء بدلالة سعة التبريد التي تعطيها هذه الوحدات ودرجة حرارة الهواء الداخل إلى المكثف.

ويبين جدول ١٤,٣ أداء بعض وحدات التكثيف المبردة بالماء تبعًا لكتالوجات الشركة المصنعة. لاحظ من الجدول انخفاض سعة التبريد بانخفاض درجة حرارة المبخر أو ارتفاع درجة حرارة المكثف. وتفضل معظم الشركات الاستعاضة عن درجة حرارة المكثف، بدرجة حرارة دخول الهواء إلى وحدة التكثيف إذا كانت هذه الوحدات تبرد بالهواء، كما هو موضح بجدول ١٤,٤. ونلاحظ من جدول ١٤,٤، لوحدات التكثيف المبردة بالهواء، أن الشركة المصنعة أعطت سعة تبريد وحدات التكثيف عند دخول الهواء بدرجة حرارة قدرها ٢٧ أو ٣٢°م فقط. وقد يتساءل البعض كيف يكون أداء هذه الوحدات عند العمل بهواء جوي تزيد درجة حرارته عند ٣٢°م، كما هو متوقع في فصل الصيف في عدة بلدان عربية.

جدول ١٤،٣ أداء بعض وحدات التكثيف ذات المكثف المبرد بالماء لمبرد ٢٢ من واقع كتالوجات الشركة المصنعة [شركة بوك Bock].

Model			R22 refrigeration capacity*, W								
(R22)	DV	TC	R22 evaporator temperature, °C								
	m^3/h	C°	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35	-40	-45
SAM 0/45-6 W	2.54	30	1874	1543	1251	1005	797	616	467	350	259
		50	1504	1225	985	778	609	467	350	259	194
SAM 1/45-4 RU	3.78	30	2890	2380	1930	1550	1230	950	720	540	400
SAM 1/45-4 W		50	2320	1890	1520	1200	940	720	540	400	300
SAM 2/58-4 RU	4.93	30	3730	3070	2490	2000	1580	1230	930	700	510
SAM 2/58-4 W		50	2980	2430	1960	1550	1210	920	700	520	390
SAM 2/73-4 RU	6.23	30	4690	3860	3140	2520	1990	1540	1170	880	640
SAM 2/73-4 W		50	3760	3060	2460	1950	1520	1160	880	650	490
SAM 2/95-4 RU	8.14	30	6100	5020	4080	3280	2590	2010	1530	1140	830
SAM 2/95-4 W		50	4890	3990	3210	2540	1980	1510	1140	850	640
SAM 2/121-4 RU	10.30	30	7770	6400	5200	4170	3290	2560	1950	1450	1060
SAM 2/121-4 W		50	6230	5080	4080	3230	2520	1930	1450	1080	810
SAM 3/153-4 RU	12.93	30	9830	8090	6580	5270	4170	3230	2460	1830	1340
SAM 3/153-4 W		50	7870	6420	5160	4090	3190	2440	1840	1370	1030
SAM 3/185-4 RU	15.79	30	11880	9780	7950	6380	5040	3910	2970	2220	1620
SAM 3/185-4 W		50	9520	7760	6240	4950	3850	2950	2220	1660	1240
SAM 3/233-4 RU	19.84	30	14960	12320	10020	8030	6340	4920	3750	2790	2050
SAM 3/233-4 W		50	11990	9780	7860	6230	4850	3710	2800	2090	1570
SAM 4/306-4 RU	26.65	30	19650	16180	13150	10550	8330	6460	4920	3670	2690
SAM 4/306-4 W		50	15750	12840	10330	8180	6370	4880	3670	2740	2060
SAM 4/370-4 RU	32.25	30	23760	19560	15910	12760	10070	7820	5950	4440	3250
SAM 4/370-4 W		50	19040	15530	12490	9890	7700	5900	4440	3310	2490
SAM 4/466-4 RU	40.52	30	29930	24640	20030	16070	12690	9840	7490	5590	4090
SAM 4/466-4 W		50	23980	19550	15730	12460	9700	7430	5590	4170	3130
SAM 4/306-4 RU	53.30	30	39300	32360	26300	21100	16660	12920	9840	7340	5380
SAM 4/306-4 W		50	31500	25680	20660	16360	12740	9760	7340	5480	4120
SAM 4/370-4 RU	64.50	30	47520	39120	31820	25520	20140	15640	11900	8880	6500
SAM 4/370-4 W		50	38080	31060	24980	19780	15400	11800	8880	6620	4980
SAM 4/466-4 RU	81.04	30	59860	49280	40060	32140	25380	19680	14980	11180	8180
SAM 4/466-4 W		50	47960	39100	31460	24920	19400	14860	11180	8340	6260

*Values in Watt at +25°C suction gas temperature, without liquid subcooling. No additional ventilation of the motors is required for deep freezing.

Key: DV = displaced volume **TC** = condenser temperature.

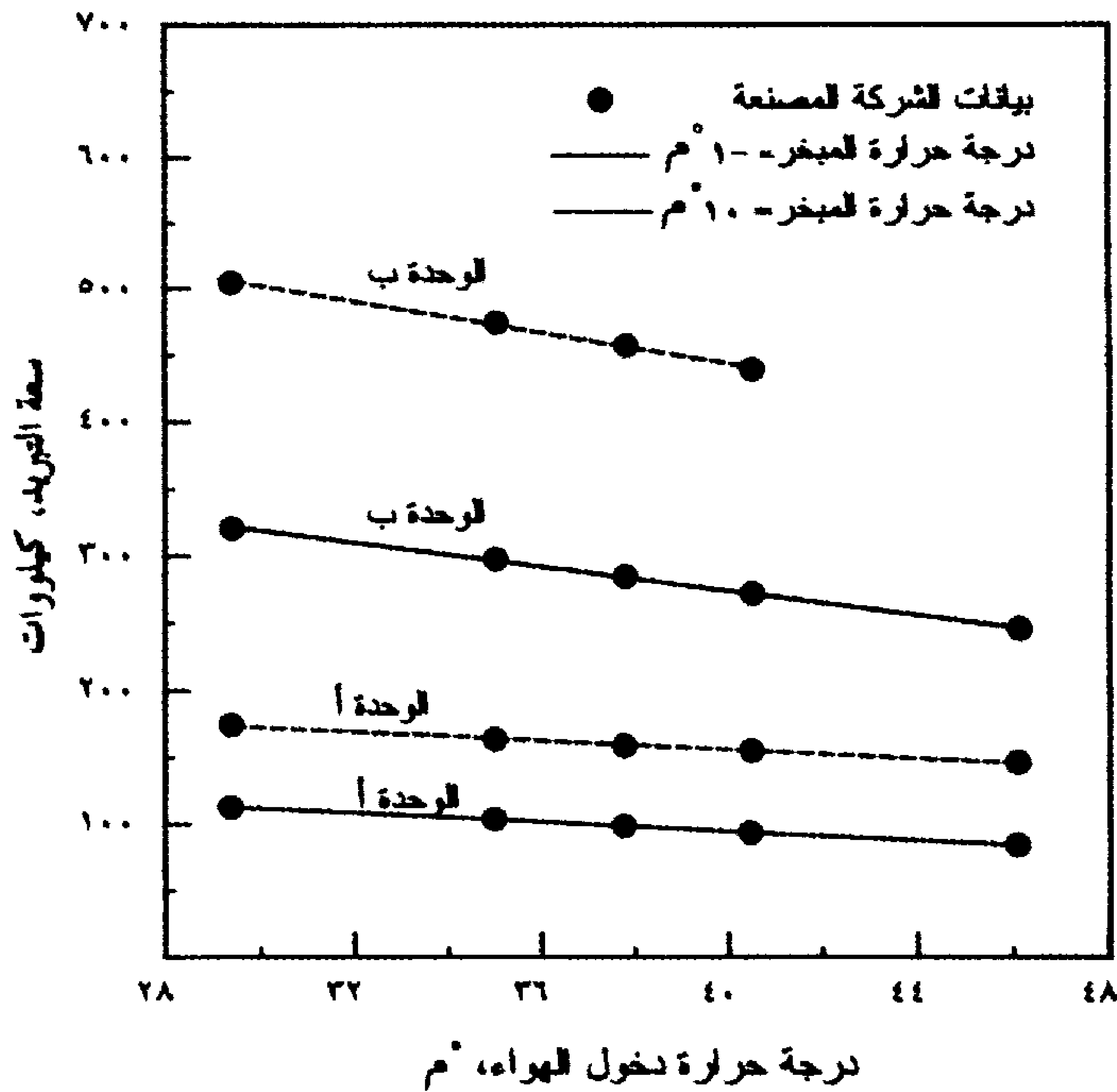
جدول ١٤,٤ أداء بعض وحدات التكثيف ذات المكثف المبرد بالهواء لمبرد ٢٢ من واقع كتالوجات الشركة المصنعة [شركة بوك Bock].

Model			R22 refrigeration capacity*, W								
(R22)	DV	TAI	R22 evaporator temperature, °C								
	m^3/h	C°	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35	-40	-45
SAM 2/58-4 L	4.93	27	3300	2770	2290	1870	1510	1180	909	686	509
		32	3110	2610	2160	1760	1420	1110	851	641	476
SAM 2/73-4 L	6.23	27	4110	3450	2850	2330	1880	1490	1140	864	641
		32	3860	3240	2680	2190	1760	1400	1070	807	600
SAM 2/95-4 L	8.14	27	5290	4430	3670	3000	2410	1910	1470	1110	823
		32	4960	4160	3440	2810	2260	1790	1370	1040	770
SAM 2/121-4 L	10.30	27	6480	5510	4620	3770	3040	2410	1860	1410	1050
		32	6050	5150	4330	3530	2840	2250	1740	1320	981
SAM 3/153-4 L	12.93	27	8720	7300	6050	4940	3980	3120	2400	1810	1340
		32	8200	6880	5690	4650	3740	2920	2240	1690	1260
SAM 3/185-4 L	15.79	27	10300	8680	7230	5910	4760	3720	2860	2160	1600
		32	9650	8150	6800	5550	4470	3490	2680	2020	1500
SAM 3/233-4 L	19.84	27	12500	10500	8780	7170	5770	4570	3560	2720	2020
		32	11600	9850	8220	6710	5400	4270	3320	2540	1890
SAM 4/306-4 L	26.65	27	17400	14600	12100	9890	7960	6240	4800	3620	2690
		32	16400	13800	11400	9300	7490	5930	4490	3380	2510
SAM 4/370-4 L	32.25	27	20600	17400	14500	11800	9510	7450	5730	4320	3210
		32	19300	16300	13600	11100	8930	6980	5350	4030	3000
SAM 4/466-4 L	40.52	27	24600	20900	17600	14300	11500	9150	7120	5440	4040
		32	23000	19600	16400	13400	10800	8550	6650	5080	3780
SAM 4/306-4 L	53.30	27	34100	28700	23900	19500	15700	12500	9220	7240	5370
		32	31900	27000	22500	18400	14800	11700	8980	6770	5030
SAM 4/370-4 L	64.50	27	40400	34100	28200	23100	18600	14700	11500	8640	6410
		32	37800	31900	26500	21600	17400	13800	10700	8070	6000
SAM 5/601-4 L	52.23	27	34600	29000	24000	19600	15800	12400	9530	7190	5270
		32	32600	27600	22900	18700	15100	11800	9040	6820	4990
SAM 5/724-4 L	62.94	27	40700	34100	28300	23100	18600	14700	11300	8550	6350
		32	38700	32500	26900	22000	17700	14000	10800	8100	6020
SAM 5/847-4 L	73.65	27	47600	39900	33100	27000	21800	17200	13300	10000	7430
		32	45300	38000	31500	25700	20700	16400	12600	9480	7040

* Values in Watt at +25°C suction gas temperature, without liquid subcooling. No additional ventilation of the motor is required for deep freezing.

Key: **DV** = displaced volume **TAI** = inlet air temperature to condensing unit.

وللإجابة على هذا السؤال دعنا ندرس تغير أداء هذه الوحدات مع درجة حرارة دخول الهواء. ويبين شكل ١٤,١٢ تغير سعة التبريد لوحدتي تكثيف "أ" و"ب" من كتالوجات إحدى الشركات المصنعة لوحدات التكثيف، مع درجة حرارة دخول الهواء إلى الوحدتين. ونلاحظ من الشكل الآتي:



شكل ١٤,١٢ تغير سعة تبريد وحدة تكثيف مبردة بالهواء مع درجة حرارة دخول الهواء إليها.

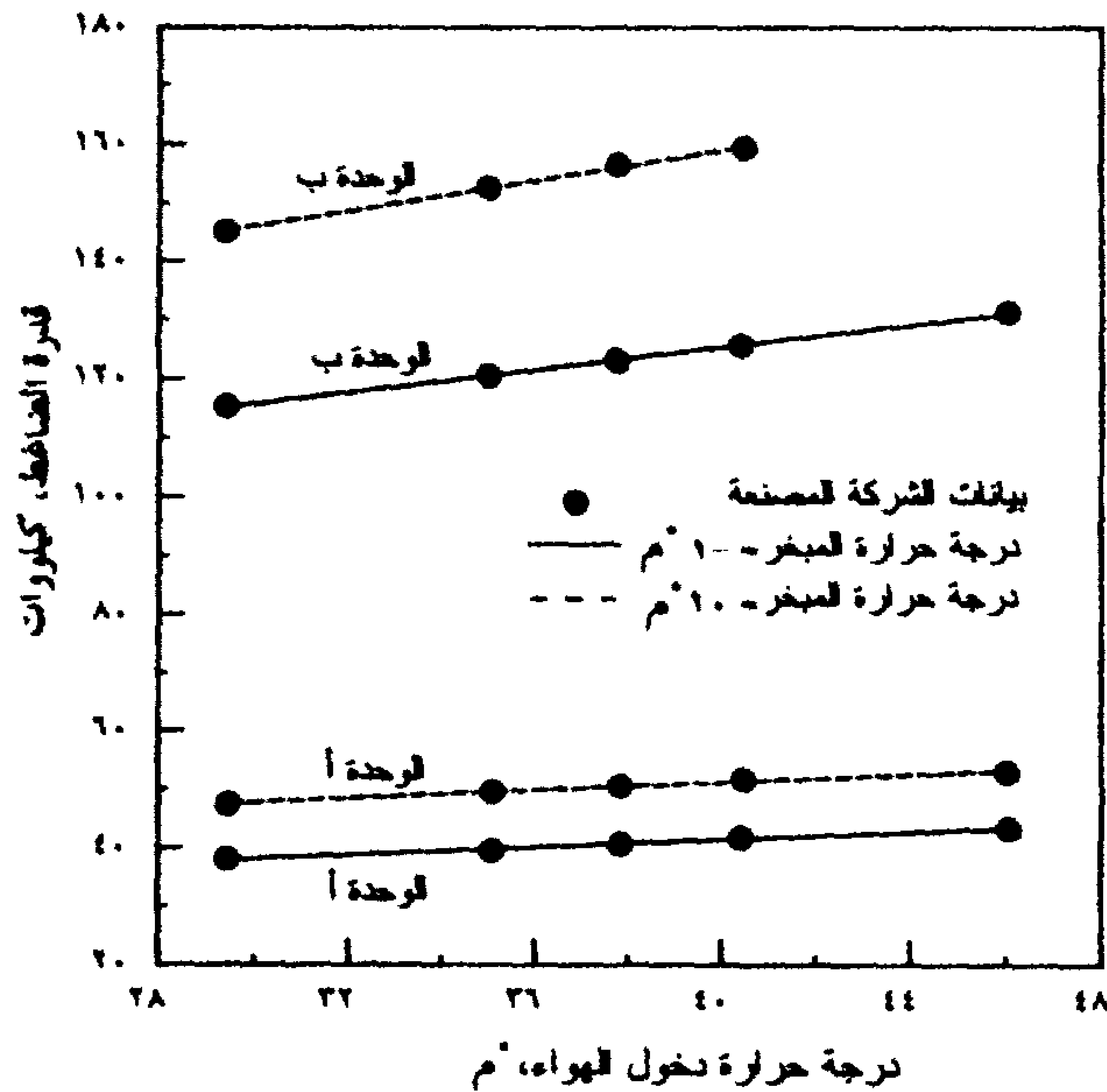
أ) تقل سعة تبريد وحدة التكثيف خطيا مع ارتفاع درجة حرارة دخول الهواء إلى وحدة التكثيف، ويعتمد معدل التغير (ميل الخط) على مواصفات وحدة التكثيف (لاحظ اختلاف ميل خط الوحدة "أ" عن ميل خط الوحدة "ب").

ب) تزيد سعة التبريد لوحدة التكييف بارتفاع درجة حرارة المبخر.

من النتيجة المعطاة في البند (أ) عاليه يمكنا القول أنه يمكن التنبؤ بسعة التبريد لوحدة التكييف عند دخول الهواء بدرجات حرارة مختلفة لتلك المعطاة

بكتالوجات الشركة المصنعة، وذلك بفرض علاقة خطية كما ذكرنا ذلك سابقًا، إلا أن هناك بعض التحفظ على ذلك إذا كانت درجة حرارة دخول الهواء خارج مدى درجات الحرارة المعطاة بالكتالوجات.

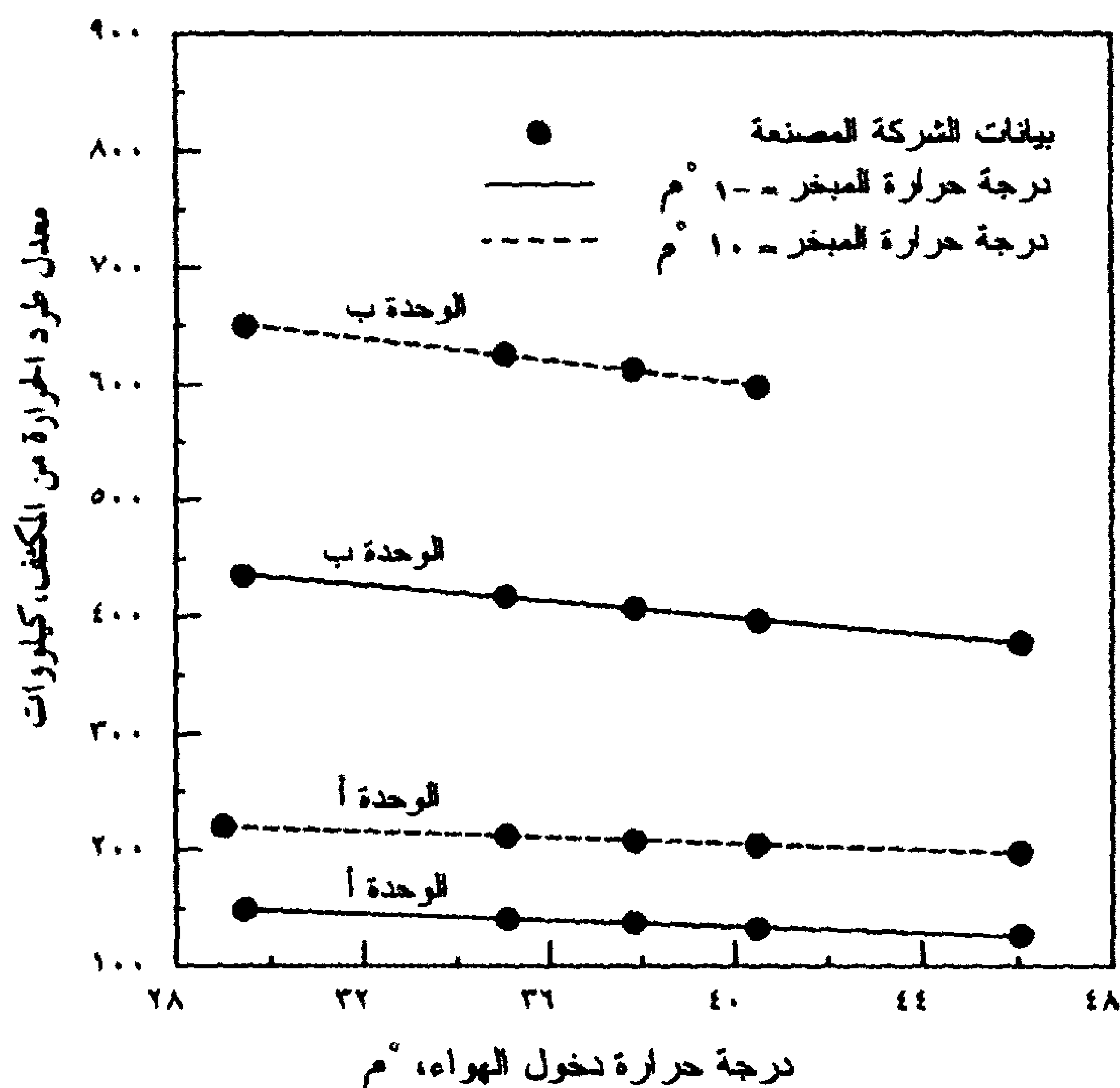
وللتعرف على طبيعة هذا التحفظ دعنا ندرس تغيير القدرة اللازمة لتشغيل الضاغط مع درجة حرارة دخول الهواء لنفس الوحدتين "أ" و"ب". من شكل ١٤,١٣ يبدو جليا زيادة القدرة اللازمة لعملية الانضغاط خطيًا بارتفاع درجة حرارة دخول الهواء. عندئذ قد يخشى من التحميل الزائد لموتور الضاغط بارتفاع درجة حرارة دخول الهواء ما لم يكون حجم الموتور يكفى للتشغيل. أيضا، قد يخشى من أن يكون مساحة سطح المكثف لا تكفي لطرد الحـــرارة من



شكل ١٤,١٣ تغير القدرة اللازمة لتشغيل الضاغط بوحدة تكثيف مبردة بالهواء مع درجة حرارة دخول الهواء إلى الوحدة.

وحدة التكثيف إذا زادت درجة حرارة دخول الهواء عن حد معين. وبمراجعة شكل ١٤,١٤ نجد انخفاض مقدار الحرارة المطردة من وحدة التكثيف بارتفاع درجة حرارة دخول الهواء، أي إن ارتفاع درجة حرارة دخول الهواء لوحدة التكثيف لا يمثل أي مشكلة لطرد الحرارة منها.

وبالتالي يكون التحفظ الوحيد على الاستنباط الخطي لعمل وحدة التكثيف عند درجة حرارة دخول الهواء أعلى من تلك المعطاة بالجداول هو التأكد من عدم التحميل الزائد لموتور الضاغط.

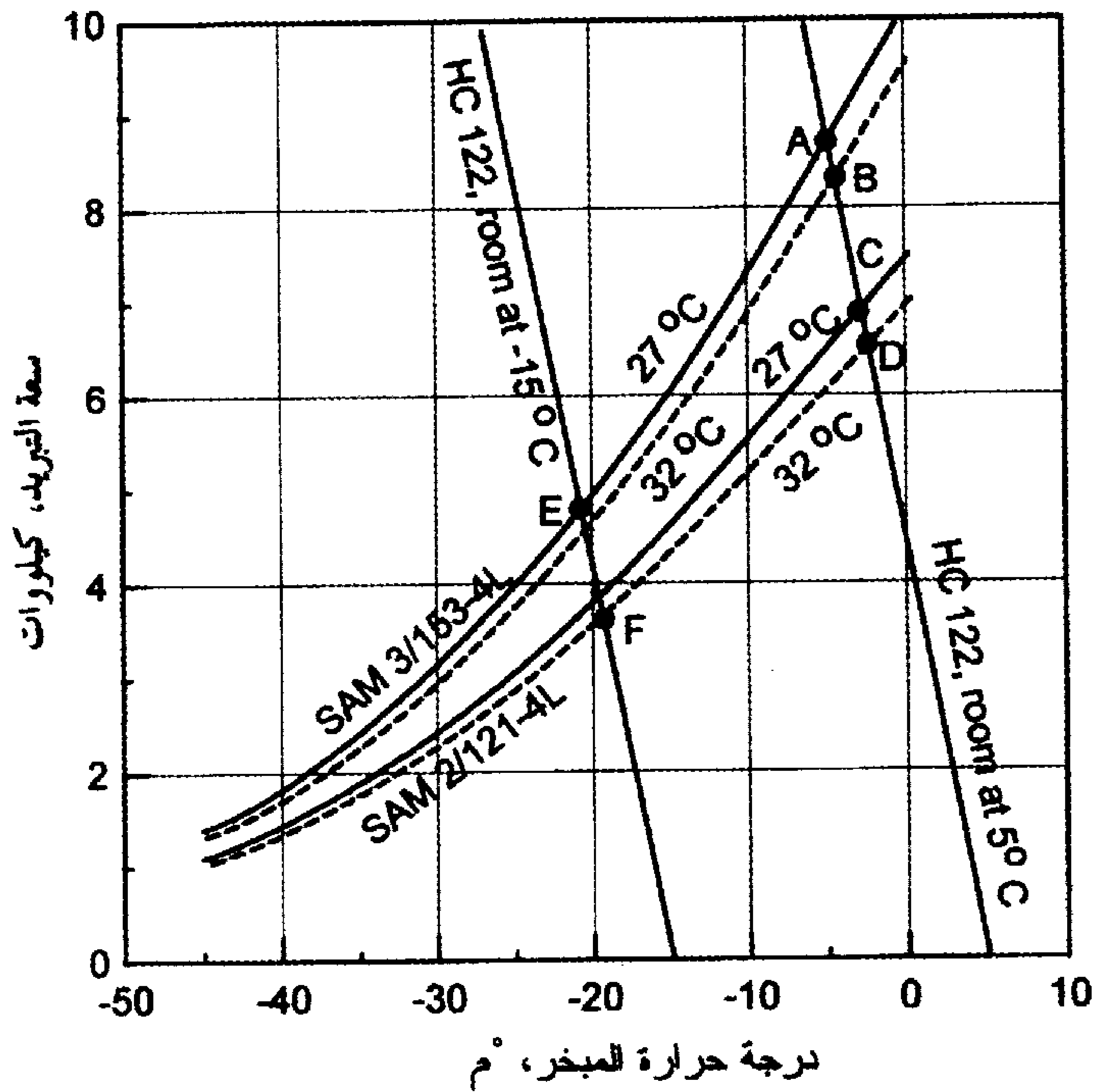


شكل ١٤,١٤ تغير معدل طرد الحرارة من وحدة تكثيف مبردة بالهواء مع درجة حرارة دخول الهواء إلى الوحدة.

١٤,٧ توافق أداء معدات التبريد

بينا فيما سبق أداء ملف التبريد، وكذلك أداء وحدات التكييف عند ظروف تشغيل مختلفة. نتساءل الآن ماذا يكون أداء هذه المعدات عندما تعمل مع بعضها البعض؟ نجيب فنقول أن نقطة الاتزان لعمل هذه الوحدات معا تعتمد على أداء كل وحدة منها بمفردها.

ولتوضيح ذلك نأخذ المثال الآتي: ماذا تكون نقطة الاتزان عندما يعمل ملف تبريد موديل HC122 (شكل ١٤,٢) بغرفة تبريد لها درجة حرارة ٥°م مع وحدة تكثيف موديل SAM 3/153-4L (جدول ١٤,٤) وتبريد بهواء عند درجة حرارة قدرها ٢٧°م. للإجابة على هذا السؤال نرسم العلاقة بين سعة التبريد ودرجة حرارة المبخر باستخدام كتالوجات الشركات المصنعة لهذه الوحدات، كما هو معطى بشكل ١٤,٢ وجدول ١٤,٤ (انظر شكل ١٤,١٥). ويتقاطع منحنى الأداء لملف التبريد ووحدة التكييف عند نقطة الاتزان A. ويعني هذا أن الوحدتين تعملان عند درجة حرارة مبخر قدرها -٥°م وسعة تبريد قدرها ٨,٨ كيلووات. فإذا ارتفعت درجة حرارة الهواء الداخل إلى وحدة التكثيف لتكون ٣٢°م، انخفضت سعة التبريد إلى ٨,٣ كيلووات وارتفعت درجة حرارة المبخر إلى -٤°م (نقطة اتزان B بالشكل)، وباختيار وحدة تكثيف موديل-SAM 2/121 4L بدلا من وحدة التكثيف السابقة، أصبحت نقطة اتزان الوحدتين هي النقطة C أو النقطة D عندما يكون دخول الهواء إلى وحدة التكثيف عند درجة حرارة ٢٧ أو ٣٢°م على التوالي (انظر الشكل). لاحظ الآن من الشكل نقطتي اتزان عمل وحدتي التكثيف السابقتين عند تغير درجة حرارة غرفة التبريد لتكون -١٥°م مع دخول هواء التبريد إلى وحدة التكثيف عند ٢٧°م أو ٣٢°م.



شكل ١٤,١٥ توافق أداء ملف التبريد مع وحدة التكثيف.

مثال ١٤,٣

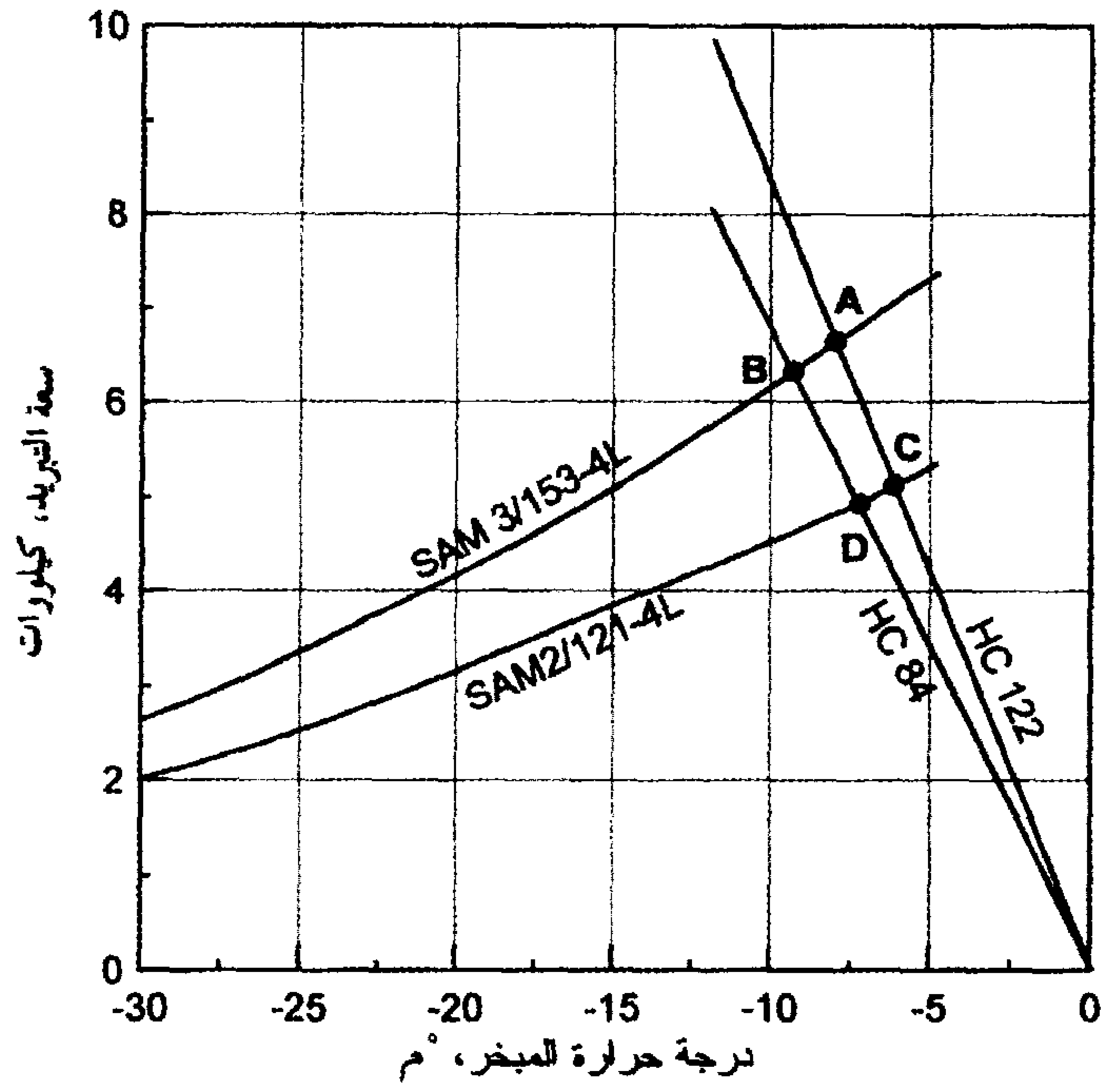
يعمل مخزن تبريد عند درجة حرارة صفر°م ورطوبة نسبية قدرها ٨٥٪ وحمل تبريد قدره ٥,٥ كيلووات. اختر من جداول الشركات المصنعة وحدة تكثيف مبردة بالهواء وملف تبريد مباشر مناسبين للعمل معًا عند هذه الظروف مع استخدام مبرد٢٢. افرض دخول هواء التبريد إلى وحدة التكثيف عند ٤٠°م.

الحل

من جدول ١٤,٤ نجد أن وحدة التكثيف موديل SAM 3/153-4L قد تكون هي المناسبة. ويعطي الجدول أداء هذه الوحدة عند دخول الهواء بدرجة حرارة قدرها ٢٧ و ٣٢°م. من هذه البيانات يمكن استنباط أداء الوحدة عند دخول الهواء بدرجة حرارة قدرها ٤٠°م إلا أنه يلزم التأكد من قدرة موتور

الضاغط على العمل عند هذه الظروف. ويبين شكل ١٤,١٦ تغير سعة التبريد لوحدة التكثيف مع درجة حرارة المبخر عند دخول الهواء عند درجة حرارة قدرها ٤٠°م. أيضا من جدول ١٤,١ نجد أن فرق درجة حرارة المبخر الواجب استخدامها هي ٧°م، وهي تناظر درجة حرارة مبخر قدرها -٧°م. عندئذ، باستخدام شكل ١٤,٢ نجد أن ملف التبريد المناسب هو موديل HC122، ومنه يمكن إيجاد تغير سعة تبريد هذا الملف مع درجة حرارة المبخر لغرفة عند درجة حرارة صفر°م. ويبين شكل ١٤,١٦ هذه العلاقة. من الشكل نجد أن نقطة الاتزان لملف التبريد مع وحدة التكثيف هي النقطة A، أي عند سعة تبريد قدرها ٦,٧ كيلووات ودرجة حرارة مبخر قدرها -٨,٢°م، أي ما يمثل فرق درجة حرارة مبخر-٨,٢°م وليس ٧°م، كما هو مطلوب. ويعني هذا انخفاض الرطوبة النسبية بالغرفة قليلا عن القيمة المطلوبة، وهي ٨٥٪. وتعطي نقطة الاتزان أيضًا سعة تبريد تزيد عن المطلوب بغرفة التبريد، مما يعني إعطاء الفرصة لإيقاف الضاغط لبعض الوقت.

ويبين شكل ١٤,١٦ نقطة الاتزان عند استخدام وحدة تكثيف وملف تبريد أصغر من الاختيارين السابقين. عندئذ تكون نقاط الاتزان هي النقاط B و C و D بالشكل. وكما هو واضح، فإن نقطتي الاتزان C و D تعطيان سعة تبريد أقل من حمل التبريد المطلوب للمخزن، مما يعني عدم صلاحية وحدة التكثيف SAM 2/121-4L للاستخدام مع التطبيق الحالي. أيضًا نلاحظ من الرسم أن نقطة الاتزان B تعطي درجة حرارة مبخر -٩°م، أي بفرق درجة حرارة مبخر قدرها ٩°م، مما يؤدي إلى خفض الرطوبة النسبية عن ٨٥٪ وبقدر أكبر من نقطة الاتزان A. لذلك السبب يكون أفضل الاختيارات في التطبيق الحالي هو ملف تبريد موديل HC122 مع وحدة تكثيف موديل SAM 3/153-4L عند نقطة اتزان A.



شكل ١٤,١٦ اختيار ملف التبريد ووحدة التكثيف لمثال ١٤,٣.

الرموز ومعانيها للفصل الرابع عشر

DV	معدل الحجم المزاح [م^3/ساعة]
h	الانثالبي [كيلو جول/ كيلوجرام]
HRF	معامل طرد الحرارة [−]
$\dot{m}$	معدل سريان المائع [كيلوجرام/ ث]
$\dot{Q}_C$	كمية الحرارة للمكثف [وات]
$\dot{Q}_E$	كمية الحرارة للمبخر [وات]
TAI	درجة حرارة الهواء الداخل لوحدة التكثيف [°م]
TD	الفرق بين درجة حرارة الهواء الداخل للمبخر و درجة حرارة المبخر [°م]
U	المعامل الكلي لانتقال الحرارة [وات/م^2.°م]

الحروف الإغريقية

ΔT_m	الفرق اللوغارتمي المؤثر لدرجات الحرارة للمبادل الحراري [°م]
ΔT_l	الفرق بين درجة حرارة الهواء الداخل للمبخر ودرجة حرارة المبخر [°م]

الفصل الخامس عشر
تصميم مخازن التبريد

١٥,١ مقدمة

في الفصل السابع تم تقديم الحسابات المختلفة لحمل التبريد لغرفة تبريد أو تجميد، حيث تم استعراض الطرق الحسابية لإيجاد الحمل الحراري نتيجة مختلف الأحمال الداخلية (مثل الأشخاص والإضاءة والمعدات) والأحمال الخارجية، مثل: حمل انتقال الحرارة، وحمل المنتج، وحمل تسرب الهواء. وبينا كيفية استخدام الأشكال والجداول والعلاقات المختلفة. كما تم في الفصل الخامس تقديم خواص المواد الغذائية المطلوبة لحسابات الحمل الحراري نتيجة المادة المراد تخزينها. وفي هذا الفصل يتم تلخيص عملية إيجاد الحمل الحراري لمخزن تبريد على هيئة خطوات متتابعة.

١٥,٢ خطوات حسابات تصميم غرف التبريد

لتسهيل العمليات الحسابية للأحمال اللآزمة للتصميم تم إعداد نموذج لحسابات وتصميم غرف التبريد على شكل جداول، انظر الشكل ١٥,١. وتتم عملية التصميم بناءً على المدخلات الخاصة بغرفة التبريد. ويحتوي النموذج على جداول يمكن استفاؤها في خطوات متسلسلة لعمل كافة الحسابات بناء على البيانات المدخلة. ولقد تم تقسيم خطوات التصميم إلى ١٤ خطوة، كما هو موضح في النموذج. وينبغي على المصمم اتباع التصميم خطوة بخطوة مع استيفاء المعلومات المطلوبة والإرشادات المرفقة للوصول إلى قيمة حمل غرفة التبريد. وقبل البدء في إجراء الحسابات المختلفة، يتم استيفاء معلومات المشروع كمسمى المشروع، وموقعه، والعنوان ووسائل الاتصال، إضافة لمعلوات

الشخص الذي قام باستيفاء المعلومات، وفيما يلي شرح لبعض التفاصيل المهمة لخطوات تصميم غرف التبريد.

الخطوة ١: مخطط الغرفة

في هذه الخطوة، كما يظهر في الشكل ١٥,١، يقوم المصمم برسم مخطط توضيحي بسيط لغرفة التبريد مع بيان أبعادها وارتفاع السقف، ودرجة الحرارة والرطوبة النسبية داخل غرفة التبريد وخارج حوائطها المختلفة.

الخطوة ٢: شروط التصميم

في هذه الخطوة يقوم المصمم بإدخال شروط التصميم للجو الخارجي وللتربة أسفل غرفة التبريد، إذا كانت غرفة التبريد في الدور الأرضي. وتؤخذ درجة حرارة التربة أقل من درجة الحرارة الجافة للهواء بحوالي ١٥°م، إذا كانت الغرفة تعمل عند درجة حرارة أعلى من الصفر المئوي، وبحوالي ٣٥ °م، إذا كانت غرفة التبريد تعمل تحت الصفر المئوي.

الخطوة ٣: مواصفات الغرفة

في هذه الخطوة يتم استيفاء الخانات بالمعلومات المتوفرة عن غرفة التبريد، مثل طول وعرض وارتفاع الغرفة خارجيًا، ودرجة الحرارة الداخلية، والرطوبة النسبية للغرفة، وفرق درجات الحرارة بين درجة حرارة الغرفة ودرجة حرارة الهواء الخارجية. كما يتم استيفاء معلومات الحوائط الخارجية والسقف، مثل: سمك العازل، والمعامل الكلي لانتقال الحرارة، وتصحيح درجات الحرارة، إضافة لعدد الأبوب وأبعادها. يقوم المصمم بعد ذلك بعمل الحسابات

البسيطة، مثل: حسابت الطول والعرض الداخلي للغرفة، وحسابات الحجم الداخلي، والحجم المقترح للتخزين.

الخطوة ٤: مواصفات المواد المخزنة

في هذه الخطوة يقوم المصمم بإدخال نوع المنتج الذي سوف يتم تخزينه في الغرفة، وحالة التبريد (تبريد أم تجميد)، وكمية المادة المخزنة، ومقدار المواد الداخلة يوميا للغرفة، ودرجة حرارة الدخول، ودرجة حرارة التخزين المطلوبة، والحرارة النوعية للمادة المخزنة (تحت درجة حرارة التجمد وفوق التجمد)، والحرارة الكامنة (إن وجد)، وحرارة التنفس (إن وجد)، وطول فترة الخفض الأولي لدرجة حرارة الغرفة. يمكن الاستفادة من الفصلين ٥ و ٦ لاستيفاء بعض المعلومات في هذه الخطوة، مثل خواص المواد الغذائية.

الخطوة ٥: مواصفات مواد التغليف والبالات

يقوم المصمم هنا بإدخال نوع مادة التعبئة ووزنها وحرارتها النوعية، وعدد البالات ووزن كل بالة، حرارتها النوعية، والوزن الإجمالي. ويتم اسخدام هذه البيانات لحساب الحمل الناتج من مواد التغليف والبالات.

الخطوة ٦: مواصفات ومعلومات أخرى

في هذه الخطوة يتم إدخال البيانات الكهربائية للمواتير والأوناش من حيث الفولت والتردد والقدرة وعدد ساعات العمل لكل منها.

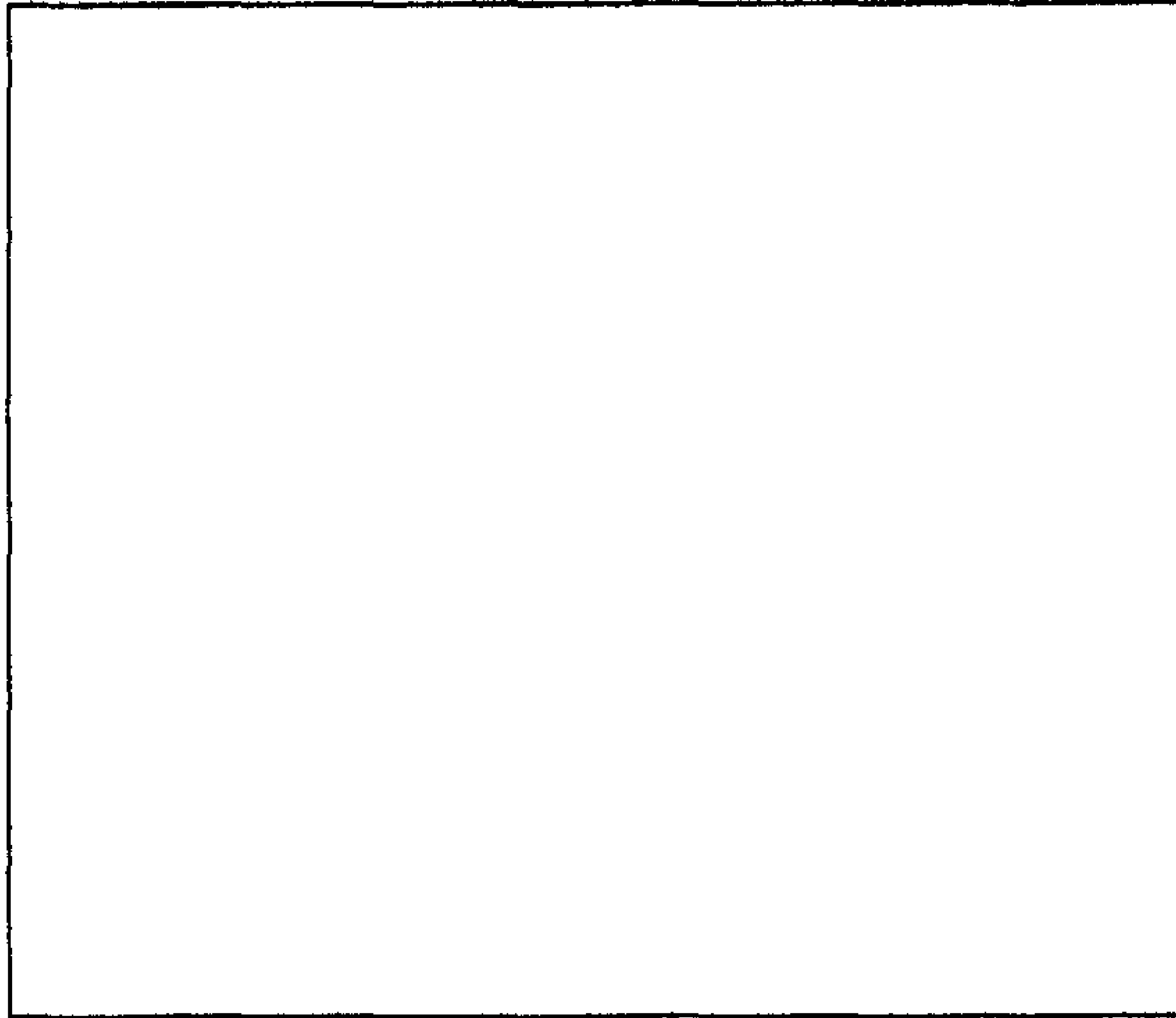
نموذج حسابات الحمل الحراري لغرفة تبريد

1		**معلومات عامة**		الوحدة
		عامل الامان		%
		نسبة الحجم المستخدم		%
		درجة حرارة التجمد		درجة مئوية
		عدد الثواني في اليوم		ثانية
		عدد ساعات عمل الضاغط		ساعة

2		**شروط التصميم**		
	أ	الهواء الخارجي صيفا		
		درجة حرارة البصيلة الجافة		درجة مئوية
		الرطوبة النسبة		%
		درجة حرارة الهواء للبصيلة المبتلة		درجة مئوية
	ب	درجة حرارة الارض		درجة مئوية

3		**مواصفات الغرفة**		
	أ	الطول الخارجي		متر
		العرض الخارجي		متر
		الارتفاع الخارجي		متر
	ب	درجة حرارة الغرفة		درجة مئوية
		الرطوبة النسبية لهواء الغرفة		درجة مئوية
	ج	الفرق في درجات الحرارة		درجة مئوية

الشكل العام لغرفة التبريد



			العزل الحراري				سمك الجدار	تعديل درجة الحرارة	فرق درجة الحرارة	تأثير الشمس	فرق درجة الحرارة	
	السطح	الاتجاه	نوع العازل	الموصلية الحرارية	السمك	U						
				وات/م °م	مم	وات/م2 °م	مم	[°م]	[°م]	[°م]	[°م]	
	1	شمال										
	2	شرق										
	3	جنوب										

شكل ١٥,١ نموذج حسابات حمل غرفة التبريد.

	4	غرب									
	5	السقف									
	6	الارضية									

د	عدد ابواب (1)				الابعاد		العرض		الارتفاع	
هـ	عدد ابواب (2)				الابعاد		العرض		الارتفاع	
و	الطول الداخلي									
ز	العرض الداخلي									
ح	الارتفاع الداخلي									
ط	الحجم الداخلي									
ي	حجم التخزين									
ك	المساحة الارضية									

4		مواصفات المواد المخزنة										
	أ	النوع	لحم مجمد			ب	الحالة					
	ج	الكمية (كجم)		كجم		د	الكمية اليومية		كيلو جرام			
	هـ	درجة حرارة الدخول				و	درجة حرارة التخزين		درجة مئوية			
	ز	الحرارة النوعية				تحت درجة حرارة التجمد			كجول/كجم درجة	أعلى من التجمد		كجول/كجم درجة
	ح	حرارة التجمد (الحرارة الكامنة)		كجول/كجم								
	ك	حرارة التنفس										
	ل	فترة الخفض الاولي لدرجة الحرارة										

5		مواصفات البالات و المنصات											
	أ	التعليب				ب	الكتلة		كجم	ج	الحرارة النوعية		كجول/كجم درجة

	د	عدد المنصات				هـ	الابعاد				الكتلة		
	و	الوزن		كجم		ز	الحرارة النوعية						
	ح	الكتلة الكلية		كجم			المعدل اليومي						

6		**موصفات و معلومات اخرى**											
	أ	فولت الطاقة الكهربائية المغذية	فولت			الاطوار							
		فولت المستخدم في التحكم	فولت			النوع							
	ب	النمط				الساعات							
	ج	الاضاءة			وات لكل متر مربع					ساعة/يوم			
	د	الونشات	العدد		[-]	كيلو وات لكل ونش			كيلو وات	ساعة/يوم			
	هـ	المواتير (1)	No.		[-]	كيلو وات لكل ماتور			كيلو وات	ساعة/يوم		الحرارة المكافئة	
		المواتير (2)	No.		[-]	كيلو وات لكل ماتور				ساعة/يوم		الحرارة المكافئة	
		المواتير (3)	No.		[-]	كيلو وات لكل ماتور				ساعة/يوم		الحرارة المكافئة	
	و	عدد الاشخاص			[-]	الحمل لكل شخص			وات	ساعة/يوم			

7		**الحمل المنتقل الى الغلاف**							
		السطح	معامل انتقال الحرارة الكلي (U)	الطول	العرض	المساحة	فرق درجة الحرارة	الحمل	

			وات/متر مربع. درجة	م	م	متر مربع	درجة مئوية	وات	
		1							
		2							
		3							
		4							
		5							
		6							
		مجموع الحمل المنتقل الى الغلاف (كيلو وات)							

8		**حمل تبريد المواد المبردة**			
		الحمل نتيجة خفض درجة الحرارة			
			الفرق في درجة الحرارة	0	FALSE
		خفض درجة الحرارة			
		حمل التجميد		كيلو وات	FALSE
		الحمل نتيجة التبريد تحت التجمد		كيلو وات	0
		الحمل نتيجة التبريد تحت التجمد للتغليف		كيلو وات	
		الحمل نتيجة التبريد تحت التجمد للمنصات		كيلو وات	
		التصحيح للحفظ الاولي لدرجة الحرارة		كيلو وات	
		مجموع حمل المواد المبردة		كيلو وات	

9		**الحمل نتيجة التسرب**		
		عامل الحرارة المحسوسة SHR		
		العامل Qs/A		
		كمية الحرارة Q		
		عدد مرات فتح الباب P		[-]
		الوقت لكل مرة يفتح فيها الباب		ثانية
		الزمن الذي يفتح فيه الباب لاعمال اخرى		دقيقة / يوم
		عامل زمن فتح الباب (Dt)		
		عامل تسرب الهواء من الباب (Df)		
		فعالية نظام فتح الباب		
		الحمل نتيجة التسرب		كيلو وات

10		**حمل التبريد من الداخلية**		
	أ	حمل الاشخاص		كيلو وات
	ب	حمل الاضاءة		كيلو وات
	ج	حمل الاوناش		
	د-1	حمل المواتير (1)		
	د-2	حمل المواتير (2)		
	د-3	حمل المواتير (3)		
	مجموع الاحمال الاخرى			كيلو وات

11		**ملخص حمل التبريد**		
	أ	الحمل المنتقل للغلاف		كيلو وات
	ب	حمل المواد المبردة		كيلو وات
	ج	حمل تسرب الهواء		كيلو وات
	د	أحمال اخرى		كيلو وات
	هـ	المجموع الجزئي		كيلو وات
	و	الحمل نتيجة عامل الامان		كيلو وات
	ز	المجموع بدون المبخرات و حمل ازالة الصقيع		كيلو وات
	ح	عدد ساعات عمل الضاغط		
	ك	التصحيح نتيجة عمل ساعات الضاغط		كيلو وات

12		**حمل دورة اذابة الصقيع**				
	أ	دورة اذابة الصقيع				
	ب	عدد دورات اذابة الصقيع في اليوم				
	ج	مدة تشغيل دورة اذابة الصقيع		دقيقة		
	د	عامل اذابة الصقيع			كهربائيا 0.5، هواء ساخن 0.4	
	هـ	حمل إذابة الصقيع كنسبة من الحمل الكلي				
		حمل إذابة الصقيع		كيلو وات		

13		**حمل مروحة المبخر**		
	أ	عدد مواتير المراوح المستخدمة لكل مبخر		
	ب	قدرة الماتور		كيلو وات
	ج	عدد ساعات العمل للمواتير		
		المكافئ الحراري		
	د	الحمل الحراري لمراوح كل مبخر		كيلو وات

14	**الحمل الكلي شاملا حمل مراوح المبخر و حمل اذابة الصقيع**			
		فرق درجات الحرارة للمبخر TD		درجة مئوية
		درجة حرارة التشبع للمبخر		درجة مئوية
		فرق درجات الحرارة للتحميص		درجة مئوية
		درجة حرارة السحب للضاغط		درجة مئوية
		الحمل الاساسي		كيلو وات
		عدد المبخرات		
		الحمل الحراري لغرفة التبريد		كيلو وات
		الحمل الحراري لكل مبخر		كيلو وات

الخطوة ٧: حمل التبريد المنتقل من الغلاف

يقوم المصمم بحساب معامل انتقال الحرارة الكلي لكل حائط، وللسقف، وللأرضية وإدخال ذلك بالجدول مع إدخال أبعاد كل سطح من أسطح انتقال الحرارة، وكذلك فرق درجة الحرارة بين جهتي السطح. وبعد إجراء حساب معدل انتقال الحرارة على كل سطح، يعطي الجدول مجموع معدلات الحرارة المنتقلة إلى الغرفة من الغلاف الخارجي.

الخطوة ٨: حمل التبريد من المواد المخزنة

هنا يقوم المصمم بحساب حمل التبريد الناتج عن المواد المخزنة، ويتم ذلك على عدة مراحل بعد إدخال البيانات الخاصة بكل مرحلة من المراحل الآتية على الترتيب (إن وجدت): خفض درجة حرارة المنتج لدرجة حرارة التجمد، والتجميد، وخفض درجة حرارة المنتج تحت درجة التجمد، وخفض درجة حرارة مواد التغليف، وخفض درجة حرارة بالات التحميل، وأخير التصحيح للخفض الأولي لدرجة الحرارة. وأخيرًا يتم حساب مجموع الحمل الناتج من المواد الخزنة في نهاية هذه الخطوة.

الخطوة ٩: حمل التبريد من تسرب الهواء الخارجي

كما بينا سابقا في بند ٧,٥ بفصل ٧، يتم إيجاد عامل الحرارة المحسوسة (SHR) عند انتقال الهواء المتسرب من خارج الغرفة إلى حالة الهواء داخل الغرفة باستخدام الجدول٧,٤. كما يتم إيجاد العامل $\dot{Q}_s / A$ من الشكل ٧,٣. و يتم إيجاد عامل فتح الباب D_t وعامل السريان D_f من المعادلات المناسبة من الفصل ٧، كما يتم استيفاء أو تقدير عامل فعالية أجهزة حماية تسرب الهواء E.

بعد ذلك يتم استخدام العلاقتين (7.20) و (7.22) المقترحتين من جمعية آشري للتبريد والتكييف لإيجاد الحمل الناتج من تسرب الهواء خلال باب غرفة التبريد.

الخطوة ١٠: حمل التبريد من المصادر الداخلية

يقوم المصمم بعد ذلك بحساب باقي أجزاء حمل التبريد الداخلية التي تم عرضها بفصل ٧، بعد إدخال البيانات اللازمة لذلك، وهي على الترتيب: حمل التبريد الناتج من الاشخاص، وحمل التبريد الناتج من الإضاءة، وحمل التبريد الناتج من الأوناش، وحمل التبريد نتيجة المواتير المختلفة بغرفة التبريد، ثم إجمالي هذه الأحمال.

الخطوة ١١: ملخص حمل التبريد

تشمل هذه الخطوة إدخال الأجزاء المختلفة لحمل التبريد طبقا لما تم حسابه في الخطوات السابقة، وذلك في البنود من أ إلى د ثم إجمالي هذه الأجزاء (انظر الشكل ١٥,١ الخطوة ١١). يقوم المصمم بإدخال معامل الامان للتصميم في بداية المعلومات العامة عن المشروع (١٠٪ على سبيل المثال) ومنه يمكن حساب الحمل نتيجة عامل الأمان. يقوم المصمم بعد ذلك بإدخال عدد الساعات المقترحة لعمل الضاغط (بند ج) ثم أخيرًا حساب حمل تبريد الغرفة بعد إدخال التصحيح اللازم لعدد ساعات الضاغط.

الخطوة ١٢: حمل دورة إذابة الصقيع

هنا يقوم المصمم باستيفاء معلوات نظام إذابة الصقيع، كنوعه (سخان كهربائي، أو غاز ساخن، أو خلافهما)، وعدد مرات إذابة الصقيع في اليوم والفترة الزمنية لإذابة الصقيع، وعنئذ يتم حساب حمل إذابة الصقيع باستخدام

المعادلة (7.15) ويؤخذ معامل الحمل لإذابة الصقيع F_{def} مساويًا لـــ ٠,٥ إذا استخدمت الكهرباء كمصدري حراري أو ٠,٤ إذا استخدم الغاز الساخن كمصدر حراري لإذابة الصقيع.

الخطوة ١٣: حمل مواتير مروحة المبخر

في هذه الخطوة يتم استيفاء معلومات موتور المبخر وعدد المراوح لكل مبخر وقدرة الموتور، وعدد ساعات العمل، وعلى ضوء ذلك يتم حساب حمل مواتير المراوح لكل مبخر باستخدام المعادلة (7.14) والجدول ٧,٣.

الخطوة ١٤: حسابات حمل المبخر

يتم استيفاء وإعادة كتابة درجة حرارة غرفة التبريد، والرطوبة النسبية، وكذلك فرق درجات الحرارة TD، كما يتم عمل حسابات درجة حرارة التشبع للمبخر، و درجة حرارة التحميص، ثم يتم عمل حساب حمل التبريد لكل مبخر.

يبين الشكل ١٥,١ نموذج حسابات الحمل الحراري لغرفة تبريد، كما جاءت في الخطوات سالفة الذكر. وقد تم عمل لوحة عمل على برنامج Excel لتسهيل العمليات الرياضية، وفي الفقرة التالية نقدم مثالا على ذلك.

١٥,٣ مثال لتصميم غرف التبريد

المطلوب هو حساب الحمل الحراري لغرفة تبريد لتخزين كمية من اللحم. سيتم استخدام نموذج حسابات الحمل الحراري (شكل ١٥,١). ويمكن اختصار معلومات تصميم غرفة التبريد الأساسية كالاتي:

أ- الهواء الخارجي عند درجة حرارة بصيلة جافة ٤٣°م، ورطوبة نسبية ٣٠٪.

ب- طول غرفة التبريد الخارجي ٢٠م، والعرض ١٢م، و الارتفاع ٦م.

ج- درجة حرارة الغرفة الداخلية -١٨°م، ورطوبة ٩٠٪.

د- المواد المراد تخزينها: ٥٠٠,٠٠٠ كجم لحم، الكمية اليومية ٥٠,٠٠٠ كيلوجرام.

هـ- درجة حرارة دخول المواد المراد تخزينها -٥°م.

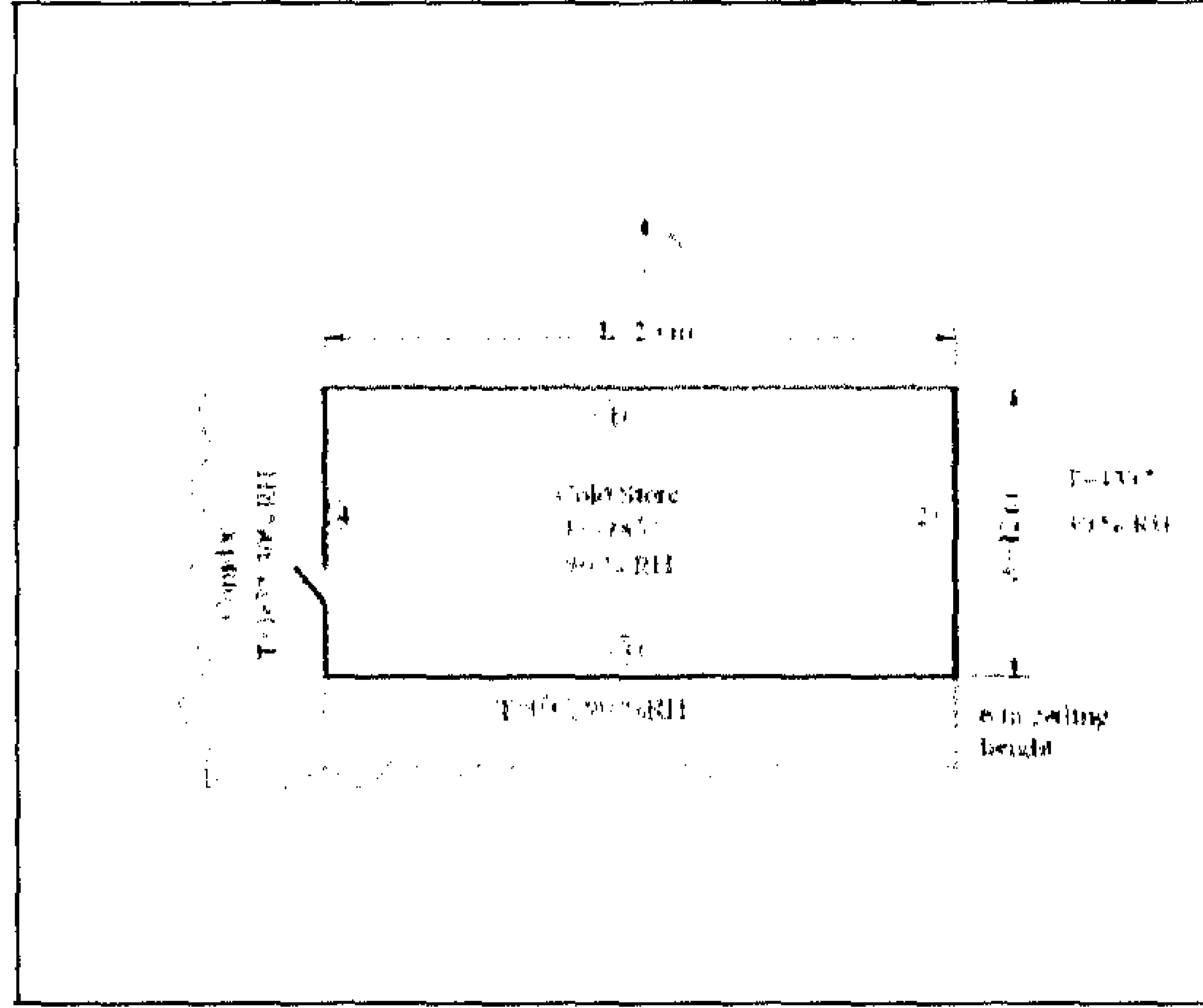
بالإضافة إلى معلومات أخرى عن الغرفة، ومواد التغليف، والأحمال الداخلية كالأشخاص والإضاءة والأوناش وغيرها. وقد تم استيفاء معلومات التصميم ووضعها في نموذج حسابات الحمل الحراري للغرفة، كما يظهر في الشكل ١٥,٢.

ومن خلال عمل الخطوات الأربعة عشر اللآزمة لعمل حسابات الحمل الحراري، وجد أن الحمل الحراري لغرفة التبريد حوالي ٩٢ كيلووات، شاملا حمل إذابة الصقيع، وحمل مراوح المبخر، والحمل الناتج عن عامل الأمان، كما يظهر في الشكل ١٥,٢.

نموذج حسابات الحمل الحراري لغرفة تبريد

1		**معلومات عامة**		الوحدة
		عامل الأمان	10	%
		نسبة الحجم المستخدم	40	%
		درجة حرارة التجمد	0	درجة مئوية
		عدد الثواني في اليوم	86400	ثانية
		عدد ساعات عمل الضاغط	18	ساعة
2		**شروط التصميم**		
	أ	الهواء الخارجي صيفا		
		درجة حرارة البصيلة الجافة	43	درجة مئوية
		الرطوبة النسبية	30	%
		درجة حرارة الهواء للبصيلة المبتلة	27	درجة مئوية
	ب	درجة حرارة الأرض	8	درجة مئوية
3		**مواصفات الغرفة**		
	أ	الطول الخارجي	20	متر
		العرض الخارجي	12	متر
		الارتفاع الخارجي	6	متر
	ب	درجة حرارة الغرفة	-18	درجة مئوية
		الرطوبة النسبية لهواء الغرفة	90	درجة مئوية
	ج	الفرق في درجات الحرارة	61	درجة مئوية

الشكل العام لغرفة التبريد



	السطح	الاتجاه	العزل الحراري نوع العازل	الموصلية الحرارية	السمك	U	سمك الجدار	تعديل درجة الحرارة	فرق درجة الحرارة	تأثير الشمس	فرق درجة الحرارة	
				وات/م °م	مم	وات/م2 °م	مم	[°م]	[°م]	[°م]	[°م]	
	1	شمال		0.037	100	0.37	202	43	61	0	61	
	2	شرق		0.037	100	0.37	202	43	61	3	64	
	3	جنوب		0.037	100	0.37	202	0	18	0	18	

شكل ١٥,٢ حل مثال على حسابات حمل غرفة التبريد.

		4	غرب		0.037	100	0.37	202	16	34	0	34	
		5	السقف		0.037	150	0.246666667	252	43	61	5	66	
		6	الارضية		0.037	150	0.246666667	350	8	26		26	
	د	عدد ابواب (1)	1			الابعاد		العرض	2	الارتفاع	2.5		
	هـ	عدد ابواب (2)	0			الابعاد		العرض		الارتفاع			
	و	الطول الداخلي	19.6										
	ز	العرض الداخلي	11.6										
	ح	الارتفاع الداخلي	5.4										
	ط	الحجم الداخلي	1,226.6										
	ي	حجم التخزين	490.6										
	ك	المساحة الارضية	227.2										
4		**مواصفات المواد المخزنة**											
	أ	النوع	لحم مجمد			ب	الحالة						
	ج	الكمية (كجم)	500,000	كجم		د	الكمية اليومية	50,000	كيلو جرام				
	هـ	درجة حرارة الدخول	-5			و	درجة حرارة التخزين	-18	درجة مئوية				
	ز	الحرارة النوعية				تحت درجة حرارة التجمد		1.7	كجول/كجم درجة	اعلى من التجمد	3.2	كجول/ كجم درجة	
	ح	حرارة التجمد (الحرارة الكامنة)	233	كجول/كجم									
	ك	حرارة التنفس											
	ل	فترة الخفض الاولي لدرجة الحرارة	12										
5		**مواصفات البالات و المنصات**											
	أ	التغليف	كرتون من الالياف			ب	الكتلة	1.8	كجم	ج	الحرارة النوعية	1.67	كجول/كجم درجة

	د	عدد المنصات	20,000			هـ	الابعاد	0.508*0.38*0.127			الكتلة	24.1	
	و	الوزن	26	كجم		ز	الحرارة النوعية	1.9					
	ح	الكتلة الكلية	518,000	كجم			المعدل اليومي	2,000					

6		موصفات و معلومات اخرى											
	أ	فولت الطاقة الكهربائية المحلية	فولت				الاطوار						
		فولت المستخدم في التحكم	فولت				النوع						
	ب	النمط					الساعات						
	ج	الاضاءة		15	وات لكل متر مربع						ساعة/يوم	8	
	د	الونشات	العدد	1	[-]		كيلو وات لكل ونش		3	كيلو وات	ساعة/يوم	6	
	هـ	المواتير (1)	No.	0	[-]		كيلو وات لكل ماتور		0	كيلو وات	ساعة/يوم	0	الحرارة المكافئة
		المواتير (2)	No.	0	[-]		كيلو وات لكل ماتور		0		ساعة/يوم	0	الحرارة المكافئة
		المواتير (3)	No.	0	[-]		كيلو وات لكل ماتور		0		ساعة/يوم	0	الحرارة المكافئة
	و	عدد الاشخاص		2	[-]		الحمل لكل شخص		390	وات	ساعة/يوم	8	

7		الحمل المنتقل الي الغلاف							
		السطح	معامل انتقال الحرارة الكلي (U)	الطول	العرض	المساحة	فرق درجة الحرارة	الحمل	
			وات/متر مربع. درجة	م	م	متر مربع	درجة مئوية	وات	
		1	0.37	19.6	5.4	105.8	61.0	2,387	
		2	0.37	11.6	5.4	62.6	64.0	1,482	
		3	0.37	19.6	5.4	105.8	18.0	704	

		4	0.37	11.6	5.4	62.6	34.0	787	
		5	0.25	19.6	11.6	227.2	66.0	3,699	
		6	0.25	19.6	11.6	227.2	26.0	1,457	
								10,518	
		مجموع الحمل المنتقل الى الغلاف (كيلو وات)						10.5	

8		**حمل تبريد المواد المبردة**			
		الحمل نتيجة خفض درجة الحرارة			
			الفرق في درجة الحرارة	-5	FALSE
		خفض درجة الحرارة	0		
		حمل التجميد	0	كيلو وات	FALSE
		الحمل نتيجة التبريد تحت التجمد	12.8	كيلو وات	1.7
		الحمل نتيجة التبريد تحت التجمد للتغليف	0.9	كيلو وات	
		الحمل نتيجة التبريد تحت التجمد للمنصات	13.8	كيلو وات	
		التصحيح للحفظ الاولي لدرجة الحرارة	27.6	كيلو وات	
		مجموع حمل المواد المبردة	27.6	كيلو وات	

9		الحمل نتيجة التسرب		
		عامل الحرارة المحسوسة SHR	0.82	
		العامل Qs/A	18.00	
		كمية الحرارة Q	100.13	
		عدد مرات فتح الباب P	32.00	[-]
		الوقت لكل مرة يفتح فيها الباب	12.00	ثانية
		الزمن الذي يفتح فيه الباب لاعمال اخرى	40.00	دقيقة / يوم
		عامل زمن فتح الباب (Dt)	0.03	
		عامل تسرب الهواء من الباب (Df)	0.80	
		فعالية نظام فتح الباب	0.90	
		الحمل نتيجة التسرب	0.26	كيلو وات

10		حمل التبريد من الداخلية		
	أ	حمل الاشخاص	0.26	كيلو وات
	ب	حمل الاضاءة	1.14	كيلو وات
	ج	حمل الاوناش	0.75	
	د-1	حمل المواتير (1)	0.00	
	د-2	حمل المواتير (2)	0.00	
	د-3	حمل المواتير (3)	0.00	
	مجموع الاحمال الاخرى		2.15	كيلو وات

11		**ملخص حمل التبريد**		
	أ	الحمل المنتقل للغلاف	10.5	كيلو وات
	ب	حمل المواد المبردة	27.6	كيلو وات
	ج	حمل تسرب الهواء	0.3	كيلو وات
	د	أحمال اخرى	2.1	كيلو وات
	هـ	المجموع الجزئي	40.5	كيلو وات
	و	الحمل نتيجة عامل الامان	4.0	كيلو وات
	ز	المجموع بدون المبخرات و حمل ازالة الصقيع	44.5	كيلو وات
	ج	عدد ساعات عمل الضاغط	18.0	
	ك	التصحيح نتيجة عمل ساعات الضاغط	59.4	كيلو وات

12		**حمل دورة اذابة الصقيع**				
	أ	دورة اذابة الصقيع				
	ب	عدد دورات اذابة الصقيع في اليوم	6.0			
	ج	مدة تشغيل دورة اذابة الصقيع	20.0	دقيقة		
	د	عامل اذابة الصقيع	0.5			كهربائيا 0.5، هواء ساخن 0.4
	هـ	حمل إذابة الصقيع كنسبة من الحمل الكلي	0.8			
		حمل إذابة الصقيع	2.0	كيلو وات		

13		حمل مروحة المبخر		
	أ	عدد مواتير المراوح المستخدمة لكل مبخر	2.0	
	ب	قدرة الماتور	1.7	كيلو وات
	ج	عدد ساعات العمل للمواتير	22.0	
		المكافئ الحراري	1.5	
	د	الحمل الحراري لمراوح كل مبخر	6.2	كيلو وات

14	الحمل الكلي شاملا حمل مراوح المبخر و حمل اذابة الصقيع			
		فرق درجات الحرارة للمبخر TD	6.0	درجة مئوية
		درجة حرارة التشبع للمبخر	-24.0	درجة مئوية
		فرق درجات الحرارة للتحميص	1.0	درجة مئوية
		درجة حرارة السحب للضاغط	-23.0	درجة مئوية
		الحمل الاساسي	59.4	كيلو وات
		عدد المبخرات	4.0	
		الحمل الحراري لغرفة التبريد	92.2	كيلو وات
		الحمل الحراري لكل مبخر	23.1	كيلو وات

المراجع

أولا: المراجع العربية

محمود، رمضان أحمد (١٩٨٨م) ، *مخازن التبريد (أساسيات – تطبيقات – مسائل محلولة)*، منشأة المعارف بالإسكندرية، الإسكندرية، مصر.

السيد، مصطفى محمد، وفتحي، **قدري أحمد**، ودرويش، **محمد علي** (١٩٩٤م)، *هندسة التبريد وتكييف الهواء*، مركز النشر العلمي: جامعة الملك عبدالعزيز.

أساسيات التحكم في أنظمة التبريد والتكييف، المؤسسة العامة للتبريد والتدريب المهني، المملكة العربية السعودية. http://cdd.gotevot.edu.sa/mvtpbooks

السيد، مصطفى محمد (١٩٩٣م)، *المعدات الأساسية لهندسة التبريد*، دار الفكر العربي، القاهرة، مصر.

ثانيًا: المراجع الأجنبية

Al-Hasawi, *Refrigerator & Water Cooler Factories,* Hasawi Cold Stores, General Catalogue, Kuwait. https://alhasawi.com.

Althouse, A. D., Turnquist C. H. and **A. F. Bracciano** (1992), *Modern Refrigeration and Air conditioning,* The Goodheart-Willcox Company publishers.

ASHRAE (1992, 2004), *Handbook of HVAC Systems and Equipment, American Society of Heating,* Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, U.S.A.

ASHRAE (1983, 1988), *Handbook of Equipment, American Society of Heating*, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, U.S.A.

ASHRAE (1985, 1989, 1993, 2005, 2009), *Handbook of Fundamentals, American Society of Heating,* Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, U.S.A.

ASHRAE (1986, 1990, 1994, 2002, 2006.2010), *Handbook of Refrigeration Systems and Applications,* SI edition, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, U.S.A.

Beckwith, T. G. and **Marangoni, R. D.** (2006) *Mechanical Measurements*, 6th edition, Addison-Wesley Publishing Company.

Bock GmbH & Co., *Catalogue of Moduler Refrigeration Units SAM, Book GmbH & Co.,* Kä ltemaschinenfabrik, Postfach 1129, KiBlingstraBe 20, D-7440 N ü rtingen, Germany.

Carrier Corporation, *Carrier Water-Cooled Condensing Units, Catalogue No. 520-701*, Carrier Corporation, U.S.A (www.carrier.com).

Cengel, Y. A. and **Cimbala, J. M.** (2006) *Fluid Mechanics. Fundamentals and Applications*, McGraw-Hill.

Cengel, Y. A. (1998), Heat Transfer A practical approach, McGraw-Hill.

Copeland GmbH, Condensing *Units, Catalogue, Copeland GmbH,* Eichborndamm 141-175, D-1000 Berlin 51, Germany (www.emersonclimate.com).

Cole, R. A. (1984), *Infiltration: A load calculation guide, The international Institute of Ammonia Refrigeration*, Sixth annual meeting, San Francisco.

Danfoss Nordborg Denmark, www.danfoss.com المنظمات الاتوماتيكية لمنشآت التبريد التجاري وتكييف الهواء

Dossat, R.J. (1981), *Principles of Refrigeration*, SI version, John Wiles & Sons, New York, U.S.A.

Dossat, R. J. (1991), *Principle of Refrigeration*, Third Edition, Prentice-Hall International editions.

EES Engineering Equation Solver, www.fchart.com

Elsayed, M.M. (1997), *Infiltration Load in Cold Rooms*, Final Report of Project No. EM 097 Research Administration of Kuwait University, Kuwait University, Kuwait.

Figliola, R. S. and **D. E. Beastey** (2006), *Theory and Design for Mechanical Measurements*, 4*th* Edition, Wiley & Sons, Inc., New York, USA.

Fox, R. W., McDonlad, A. T. and **Pritchard, P. J.** (2004), *Introduction to fluid mechanics*, 6*th* Edition, Wiley.

Gahin, S., Elsayed, M. M. and **Ghazi, M.A.** (1985), *Introduction to Engineering Fluid Mechanics*, King Abdulaziz University Press, Jeddah, Saudi Arabia.

Gosney, W.B. and **Olama, H. A.** (1975), "Heat and enthalpy gains through cold rooms doorways", *Proceedings of Institute of Refrigeration, Environmental Science and Technology, The Polytechnic of the South Bank, London.*

Gosney, W.B. (1982), *Principles of Refrigeration*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K.

Hallowell, E. R. (1980), *Cold and Freezer Storage Manual*, AVI Publishing Company, Inc, Westport, CI, USA.

Harris, N.C. (1983), *Modern Air Conditioning Practice*, McGraw-Hill Book Company, New York, U.S.A.

Heap, R. D. (2006), Cold Chain Performance Issues Now and in the Future, Review Article, *International Institute of Refrigeration (IIR), Bulletin* 2006-4.

Holman, J. P. (2001), *Experimental Methods for Engineers*, 7^{th} Edition, McGraw-Hill.

Honeywell Engineering Manual of Automatic Control for Commercial Buildings (1988), Honeywell, Honeywell Inc., USA.

http://www.epa.gov/ozone/index.html

http://ozone.unep.org

Incropera, F. P. and **Dewitt, D. P.** (2002), *Fundamentals of Heat and Mass Transfer,* Fourth Edition, John Wiley.

IIR (International Institute of Refrigeration) (1993), *Cold Store Guide*, Published by International Institute of Refrigeration, France.

Jones, B.W., Beck, B.T. and **Steele** (1983), *Latent Loads in Low-Humidity Rooms due to Moisture*, ASHRAE Trans., No. 2738.

LU-VE Contrado (1994), *Thermal Environmental Engineering*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., U.S.A.

Koelet, P. C. (1992), *Industrial Refrigeration: Principles, Design and Applications,* Marcel Dekker .

Kreith, F. and **Bohn, M. S.** (1993), *Principle of Heat Transfer*, 5*th* Edition, West Publication, New York, USA.

Kuehn, T. H., Ramsey, J. W. and **Therlkeld, J. L.** (1998), *Thermal Environmental Engineering*, 3*ed* Edition, Prentice Hall.

McAdams, W. H. (1954), *Heat Transmission*, 3*th* Edition.

McQuistion, F. C., Parker, J. D. and **Spitler, J. D.** (2005), *Heating, Ventilation, and Air Conditioning (Analysis and Design). 6th* Edition, John Wiley.

Munson, B. R., Young, D.F. and **Okiishi, T.H.** (1998), *Fundamentals of Fluid Mechanics, 3ed* Edition, John Wiley.

Ozisik, M. N. (1989), *Heat Transfer: A Basic Approach*, McGraw-Hill.

Pita, E.G. (1984), *Refrigeration Principles and Systems: An Energy Approach,* John Wiley & Sons, New York, U.S.A.

Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties, (2007), Refprop8, NIST Standard Reference 23, version 8, National Institute of Standard Technology, www.nist.org

Raznjevic, K. (1976), *Handbook of Thermodynamic Tables and Charts*, Hemisphere Publishing Corp.

Schneider, R. K. (1981), *HVAC Control Systems*, Wiley, New York.

Siebel, J. E. (1892), *Specific Heat of Various Products*, *Ice and Refrigeration*, p.256

Staefa Control System (1988), *Introduction to HVAC Control Engineering and Computers*, Staefa Control System.

Stoecker, W. F. and **Jones, J. W.** (1982), *Refrigeration and Air Conditioning*, McGraw-Hill, 2*nd* Edition.

Threlkeld, J.L. (1970), *Thermal Environmental Engineering,* Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., U.S.A.

Wang, S. K. (2001), *Handbook of Air Conditioning and Refrigeration,* 2*nd* Edition, McGraw-Hill.

الملاحق

ثبت المصطلحات

عربي/ إنجليزي

- أ -

إجراء أداة التحكم	control action
أداة التحكم	controlled device
إذابة الصقيع	defrost
إشارة مرجعية	feed back
الانحراف	offset
التحكم التفاضلي	derivative control
التحكم في الضغط العالي	high pressure control
التأخير الزمني	time lag
التفاوت الفعلي	acutal differential
الصقيع	frost
اللزوجة الديناميكية	dynamic viscosity
اللزوجة الكيناماتيكية	kinematic viscosity
المتحكم	controller
المتغير المراد التحكم فيه	controlled variable
أوزون	ozone
إشارة رقمية	digital signal

- ب -

بخار	vapor

برج تبريد	cooling tower
بصيلة	bulb
بلف أو صمام أو محبس	valve
بيئة داخلية	internal environmental

- ت -

تأثير تبريدي	refrigeration effect
تبريد بانضغاط البخار	vapor compression refrigeration
تبريد محسوس	sensible cooling
تحكم أمان	safety control
تحكم آلي	automatic control
تحكم تناسبي	proportional control
تحكم تناسبي+ تكاملي	proportional + integral control
تحكم رقمي	digital control
تحكم متغير	modulating control
تحكم من نوع تشغيل- قفل	on-off control
تحكم من نوع تشغيل- قفل موقوت	time on-off control
تحكم من نوع عائم سائب	floating control
تخزين حراري	thermal storage
تسخين محسوس	sensible heating
تفاوت التشغيل	operational differential
تفاوت الحاكم	control differential
تكييف هواء	air conditioning
توربين	turbine

- ث -

ثيرمستر	thermistor
ثيرموستات	thermostat

- ج -

جمعية مهندسي التبريد وتكييف الهواء الأمريكيين	ASHRAE

- ح -

حاس درجة حرارة	temperature sensor
حاس درجة حرارة ثنائي المعدن	bimetal temperature sensor
حجم نوعي	specific volume
حمل	load
حمل التبريد	cooling load
حمل حر (حمل طبيعي)	free convection (natural)
حمل حراري	thermal load
حمل قسري	forced conversion

- خ -

خانقة هواء	air damper
خريطة السيكرومترية	psychrometric chart
خزان حراري (بنك حراري)	thermobank

- د -

دائرة تحكم مغلقة	closed loop control
دائرة تحكم مفتوحة	open loop control
دائرة ضخ التفريغ	pump down cycle

دالة التحويل	transfer function
درجة حرارة	temperature
درجة حرارة بصيلة جافة	dry bulb temperature
درجة حرارة بصيلة مبتلة	wet bulb temperature
درجة حرارة نقطة الندى	dew point temperature

- ر -

راحة حرارية	thermal comfort
رطوبة نسبية	relative humidity
رقمي	digital
ريشة	vane

- ز -

زعنفة	fin

- س -

سريان	flow
سطح ممتد	extended surface
سلك الانفعال	strain gauge
سلك المقاومة الحراري	RTD
سيكرومتري	psychromety

- ش -

شبه موصل	semi conductor
شطح سفلي	under shoot
شطح علوي	overshoot
شغل	work

شغل ميكانيكي	mechanical work

- ص -

صمام الصفيحة والثقب	orifice plate valve
صمام أو بلف مغناطيسي	solenoid valve
صمام تمدد	expansion valve
صمام تمدد ثرموستاتي	thermostatic expansion valve
صمام لا عودة	non-return valve

- ض -

ضاغط	compressor
ضاغط ترددي	reciprocating compressor
ضاغط لولبي	screw compressor
ضاغط محكم الغلق	hermetic compressor
ضاغط مفتوح	open compressor
ضاغط نصف مغلق	semi hermetic compressor

- ط -

طرد	discharge

- ع -

عادم	exhaust
عملية	process
عملية سيكرومترية	psychrometric process

- ف -

فعل عكسي	revise acting

فعل مباشر	direct acting

- ك -

كباس	piston
كفاءة	efficiency

- م -

ماء تعويض	makeup water
مائع تبريد	refrigerant
مبادل إعادة البخر	re-evaporator
مبادل حراري	heat exchanger
مبخر الأنبوب والغلاف	evaporator, shell and tube
متحكم في الرطوبة	humidistat
متحكم في الضغط	pressurestat
متعدد المناطق	multi zone
مثلج مياه	chiller
مجس	sensor
محبس ثلاثي	two way valve
محبس ثلاثي للتوزيع	three way diverting valve
محبس ثلاثي للخلط	three way mixing valve
محبس عدم مرور	check valve
محول إشارة	signal convertor
مدى التحكم	throttling range
مرحل	relay
مرحل ببلف	relay valve

humidifier	مُرطّب
elastic	مرونة
suction stroke	مشوار السحب
discharge stroke	مشوار الطرد
electronic source	مصدر إلكتروني
energy source	مصدر طاقة
electric source	مصدر كهربائي
pump	مضخة
thermal expansion factor	معامل التمدد الحراري
normally closed	مغلق عادة
safety switch	مفتاح أمان
low oil pressure switch	مفتاح ضغط الزيت
low pressure cut out	مفتاح ضغط السحب
high pressure cutout	مفتاح ضغط الطرد
normally open	مفتوح عادة
condenser	مكثف
condenser, evaporative	مكثف تبخيري
condenser, water cooled	مكثف مبرد بالماء
condenser, air cooled	مكثف مبرد بالهواء
split air conditioner	مكيف منفصل الوحدات (سبليت)
cooling coil	ملف تبريد
heating coil	ملف تسخين
zone	منطقة

منفاخ	bellows
مواصفة	specification
موجه ، محرك، محفز	actuator
ميكروبروسيسور	microprocessor

- ن -

نسبة رطوبة	humidity ratio
نقطة الضبط	set point
نقطة ضبط	control point
نوعية الهواء الداخلي	indoor air quality

- هـ -

هوائي	pneumatic
هيغروميتر	hygrometer

- و -

وحدة ملف و مروحة	fan coil unit
وسط المحكوم	control medium
وسيط (وسيلة) التحكم	control agent

إنجليزي / عربي

- A –

actuator	موجه ، محرك، محفز
actual differential	التفاوت الفعلي
air conditioning	تكييف هواء
air damper	خانقة هواء
ASHRAE	جمعية مهندسي التبريد وتكييف الهواء الأمريكيين
automatic control	تحكم آلي

– B -

bellows	منفاخ
bimetal temperature sensor	حاس درجة حرارة ثنائي المعدن
bulb	بصيلة

- C -

check valve	محبس عدم مرور
chiller	مثلج مياه
closed loop control	دائرة تحكم مغلقة
compressor	ضاغط
condenser	مكثف
condenser, air cooled	مكثف مبرد بالهواء
condenser, evaporative	مكثف تبخيري
condenser, water cooled	مكثف مبرد بالماء
control action	إجراء أداة التحكم
control agent	وسيط (وسيلة) التحكم
control differential	تفاوت الحاكم
control medium	وسط المحكوم

control point	نقطة الضبط
controlled device	أداة التحكم
controlled variable	المتغير المراد التحكم فيه
controller	المتحكم
cooling coil	ملف تبريد
cooling load	حمل التبريد
cooling tower	برج تبريد

- D -

defrost	إذابة الصقيع
derivative control	التحكم التفاضلي
dew point temperature	درجة حرارة نقطة الندى
digital	رقمي
digital control	تحكم رقمي
digital signal	إشارة رقمية
direct acting	فعل مباشر
discharge	طرد
discharge stroke	مشوار الطرد
dry bulb temperature	درجة حرارة بصيلة جافة
dynamic viscosity	اللزوجة الديناميكية

- E -

efficiency	كفاءة
elastic	مرونة
electric source	مصدر كهربائي
electronic source	مصدر إلكتروني
energy source	مصدر طاقة
evaporator, shell and tube	مبخر الأنبوب والغلاف
exhaust	عادم

expansion valve	صمام تمدد
extended surface	سطح ممتد
- F -	
fan coil unit	وحدة ملف و مروحة
feed back	إشارة مرجعية
fin	زعنفة
floating control	تحكم من نوع عائم سائب
flow	سريان
forced conversion	حمل قسري
free convection (natural)	حمل حر (حمل طبيعي)
frost	الصقيع
- H -	
heat exchanger	مبادل حراري
heating coil	ملف تسخين
hermetic compressor	ضاغط محكم الغلق
high pressure control	التحكم في الضغط العالي
high pressure cutout	مفتاح ضغط الطرد
humidifier	مُرطّب
humidistat	متحكم في الرطوبة
humidity ratio	نسبة رطوبة
hygrometer	هيغروميتر
- I -	
indoor air quality	نوعية الهواء الداخلي
internal environmental	بيئة داخلية
- K -	
kinematic viscosity	اللزوجة الكيناماتيكية
- L -	
load	حمل

low oil pressure switch	مفتاح ضغط الزيت
low pressure cut out	مفتاح ضغط السحب

- M -

makeup water	ماء تعويض
mechanical work	شغل ميكانيكي
microprocessor	ميكروبروسيسور
modulating control	تحكم متغير
multi zone	متعدد المناطق

- N -

non-return valve	صمام لا عودة
normally closed	مغلق عادة
normally open	مفتوح عادة

- O -

offset	الانحراف
on-off control	تحكم من نوع تشغيل – قفل
open compressor	ضاغط مفتوح
open loop control	دائرة تحكم مفتوحة
operational differential	تفاوت التشغيل
orifice plate valve	صمام الصفيحة والثقب
overshoot	شطح علوي
ozone	أوزون

- P -

piston	كباس
pneumatic	هوائي
pressurestat	متحكم في الضغط
process	عملية
proportional + integral control	تحكم تناسبي + تكاملي

proportional control	تحكم تناسبي
psychrometric chart	خريطة السيكرومترية
psychrometric process	عملية سيكرومترية
psychromety	سيكرومتري
pump	مضخة
pump down cycle	دائرة ضخ التفريغ

- R -

reciprocating compressor	ضاغط ترددي
re-evaporator	مبادل إعادة البخر
refrigerant	مائع تبريد
refrigeration effect	تأثير تبريدي
relative humidity	رطوبة نسبية
relay	مرحل
relay valve	مرحل ببلف
revise acting	فعل عكسي
RTD	سلك المقاومة الحراري

- S -

safety control	تحكم أمان
safety switch	مفتاح أمان
screw compressor	ضاغط لولبي
semi conductor	شبه موصل
semi hermetic compressor	ضاغط نصف مغلق
sensible cooling	تبريد محسوس
sensible heating	تسخين محسوس
sensor	مجس
set point	نقطة الضبط
signal convertor	محول إشارة

solenoids valve	صمام أو بلف مغناطيسي
specific volume	حجم نوعي
specification	مواصفة
split air conditoner	مكيف منفصل الوحدات (سبليت)
strain gauge	سلك الانفعال
suction stroke	مشوار السحب

- T -

temperature	درجة حرارة
temperature sensor	حاس درجة حرارة
three way diverting valve	محبس ثلاثي للتوزيع
three way mixing valve	محبس ثلاثي للخلط
thermal comfort	راحة حرارية
thermal expansion factor	معامل التمدد الحراري
thermal load	حمل حراري
thermal storage	تخزين حراري
thermistor	ثيرمستر
thermobank	خزان حراري (بنك حراري)
thermostat	ثيرموستات
thermostatic expansion valve	صمام تمدد ثرموستاتي
throttling range	مدى التحكم
time lag	التأخير الزمني
time on-off control	تحكم من نوع تشغيل- قفل موقوت
transfer function	دالة التحويل
turbine	توربين
two way valve	محبس ثلاثي

- U -

under shoot	شطح سفلي

- V -

valve	بلف أو صمام أو محبس
vane	ريشة
vapor	بخار
vapor compression refrigeration	تبريد بانضغاط البخار

- W -

wet bulb temperature	درجة حرارة بصيلة مبتلة
work	شغل

- Z -

zone	منطقة

ملحق أ: خواص بعض المبردات

جدول أ-١ الخواص الثيرموديناميكية لمبرد R-22 لسائل مشبع وبخار مشبع [ASHRAE 2009].

درجة الحرارة °م	الضغط ميغاباسكال	الكثافة كجم/م³ سائل	الحجم النوعي م³/كجم بخار	الإنثالبي كجول/كجم سائل	الإنثالبي كجول/كجم بخار	الإنتروبي كجول/كجم.كلفن سائل	الإنتروبي كجول/كجم.كلفن بخار	الحرارة النوعية كجول/كجم.كلفن سائل	الحرارة النوعية كجول/كجم.كلفن بخار	c_p/c_v بخار	سرعة الصوت م/ث سائل	سرعة الصوت م/ث بخار	اللزوجة ميكرو باسكال.ث سائل	اللزوجة ميكرو باسكال.ث بخار	معامل التوصيل ملي وات/م.كلفن سائل	معامل التوصيل ملي وات/م.كلفن بخار	التوتر السطحي ملي نيوتن/م	درجة الحرارة °م
-100	0.00201	1571.3	8.26600	90.71	358.97	0.5050	2.0543	1.061	0.497	1.243	1127	143.6	845.8	7.25	143.1	4.46	28.12	-100
-90	0.00481	1544.9	3.64480	101.32	363.85	0.5646	1.9980	1.061	0.512	1.237	1080	147.0	699.4	7.67	137.8	4.84	26.36	-90
-80	0.01037	1518.2	1.77820	111.94	368.77	0.6210	1.9508	1.062	0.528	1.233	1033	150.3	591.0	8.09	132.6	5.25	24.63	-80
-70	0.02047	1491.2	0.94342	122.58	373.70	0.6747	1.9108	1.065	0.545	1.231	986	153.3	507.6	8.52	127.6	5.68	22.92	-70
-60	0.03750	1463.7	0.53680	133.27	378.59	0.7260	1.8770	1.071	0.564	1.230	940	156.0	441.4	8.94	122.6	6.12	21.24	-60
-50	0.06453	1435.6	0.32385	144.03	383.42	0.7752	1.8480	1.079	0.585	1.232	893	158.3	387.5	9.36	117.8	6.59	19.58	-50
-48	0.07145	1429.9	0.29453	146.19	384.37	0.7849	1.8428	1.081	0.589	1.233	884	158.7	377.8	9.45	116.9	6.69	19.25	-48
-46	0.07894	1424.2	0.26837	148.36	385.32	0.7944	1.8376	1.083	0.594	1.234	875	159.1	368.6	9.53	115.9	6.79	18.92	-46
-44	0.08705	1418.4	0.24498	150.53	386.26	0.8039	1.8327	1.086	0.599	1.235	865	159.5	359.6	9.62	115.0	6.89	18.59	-44
-42	0.09580	1412.6	0.22402	152.70	387.20	0.8134	1.8278	1.088	0.603	1.236	856	159.9	351.0	9.70	114.0	6.99	18.27	-42
-40.81[b]	0.10132	1409.2	0.21260	154.00	387.75	0.8189	1.8250	1.090	0.606	1.236	851	160.1	346.0	9.75	113.5	7.05	18.08	-40.81
-40	0.10523	1406.8	0.20521	154.89	388.13	0.8227	1.8231	1.091	0.608	1.237	847	160.3	342.6	9.79	113.1	7.09	17.94	-40
-38	0.11538	1401.0	0.18829	157.07	389.06	0.8320	1.8186	1.093	0.613	1.238	838	160.6	334.5	9.87	112.2	7.19	17.62	-38
-36	0.12628	1395.1	0.17304	159.27	389.97	0.8413	1.8141	1.096	0.619	1.239	828	160.9	326.7	9.96	111.2	7.29	17.30	-36
-34	0.13797	1389.1	0.15927	161.47	390.89	0.8505	1.8098	1.099	0.624	1.241	819	161.2	319.1	10.04	110.3	7.40	16.98	-34
-32	0.15050	1383.2	0.14682	163.67	391.79	0.8596	1.8056	1.102	0.629	1.242	810	161.5	311.7	10.12	109.4	7.51	16.66	-32
-30	0.16389	1377.2	0.13553	165.88	392.69	0.8687	1.8015	1.105	0.635	1.244	800	161.8	304.6	10.21	108.5	7.61	16.34	-30
-28	0.17819	1371.1	0.12528	168.10	393.58	0.8778	1.7975	1.108	0.641	1.246	791	162.0	297.7	10.29	107.5	7.72	16.02	-28
-26	0.19344	1365.0	0.11597	170.33	394.47	0.8868	1.7937	1.112	0.646	1.248	782	162.3	291.0	10.38	106.6	7.83	15.70	-26
-24	0.20968	1358.9	0.10749	172.56	395.34	0.8957	1.7899	1.115	0.653	1.250	772	162.5	284.4	10.46	105.7	7.94	15.39	-24
-22	0.22696	1352.7	0.09975	174.80	396.21	0.9046	1.7862	1.119	0.659	1.253	763	162.7	278.1	10.55	104.8	8.06	15.07	-22
-20	0.24531	1346.5	0.09268	177.04	397.06	0.9135	1.7826	1.123	0.665	1.255	754	162.8	271.9	10.63	103.9	8.17	14.76	-20
-18	0.26479	1340.3	0.08621	179.30	397.91	0.9223	1.7791	1.127	0.672	1.258	744	163.0	265.9	10.72	103.0	8.29	14.45	-18
-16	0.28543	1334.0	0.08029	181.56	398.75	0.9311	1.7757	1.131	0.678	1.261	735	163.1	260.1	10.80	102.1	8.40	14.14	-16
-14	0.30728	1327.6	0.07485	183.83	399.57	0.9398	1.7723	1.135	0.685	1.264	726	163.2	254.4	10.89	101.1	8.52	13.83	-14
-12	0.33038	1321.2	0.06986	186.11	400.39	0.9485	1.7690	1.139	0.692	1.267	716	163.3	248.8	10.98	100.2	8.65	13.52	-12
-10	0.35479	1314.7	0.06527	188.40	401.20	0.9572	1.7658	1.144	0.699	1.270	707	163.3	243.4	11.06	99.3	8.77	13.21	-10
-8	0.38054	1308.2	0.06103	190.70	401.99	0.9658	1.7627	1.149	0.707	1.274	697	163.4	238.1	11.15	98.4	8.89	12.91	-8
-6	0.40769	1301.6	0.05713	193.01	402.77	0.9744	1.7596	1.154	0.715	1.278	688	163.4	233.0	11.24	97.5	9.02	12.60	-6
-4	0.43628	1295.0	0.05352	195.33	403.55	0.9830	1.7566	1.159	0.722	1.282	679	163.4	227.9	11.32	96.6	9.15	12.30	-4
-2	0.46636	1288.3	0.05019	197.66	404.30	0.9915	1.7536	1.164	0.731	1.287	669	163.4	223.0	11.41	95.7	9.28	12.00	-2
0	0.49799	1281.5	0.04710	200.00	405.05	1.0000	1.7507	1.169	0.739	1.291	660	163.3	218.2	11.50	94.8	9.42	11.70	0
2	0.53120	1274.7	0.04424	202.35	405.78	1.0085	1.7478	1.175	0.748	1.296	650	163.2	213.5	11.59	93.9	9.56	11.40	2
4	0.56605	1267.8	0.04159	204.71	406.50	1.0169	1.7450	1.181	0.757	1.301	641	163.1	208.9	11.68	93.1	9.70	11.10	4
6	0.60259	1260.8	0.03913	207.09	407.20	1.0254	1.7422	1.187	0.766	1.307	632	163.0	204.4	11.77	92.2	9.84	10.81	6
8	0.64088	1253.8	0.03683	209.47	407.89	1.0338	1.7395	1.193	0.775	1.313	622	162.8	200.0	11.86	91.3	9.99	10.51	8
10	0.68095	1246.7	0.03470	211.87	408.56	1.0422	1.7368	1.199	0.785	1.319	613	162.6	195.7	11.96	90.4	10.14	10.22	10
12	0.72286	1239.5	0.03271	214.28	409.21	1.0505	1.7341	1.206	0.795	1.326	603	162.4	191.5	12.05	89.5	10.29	9.93	12
14	0.76668	1232.2	0.03086	216.70	409.85	1.0589	1.7315	1.213	0.806	1.333	594	162.2	187.3	12.14	88.6	10.45	9.64	14
16	0.81244	1224.9	0.02912	219.14	410.47	1.0672	1.7289	1.220	0.817	1.340	584	161.9	183.2	12.24	87.7	10.61	9.35	16
18	0.86020	1217.4	0.02750	221.59	411.07	1.0755	1.7263	1.228	0.828	1.348	575	161.6	179.2	12.33	86.8	10.77	9.06	18
20	0.91002	1209.9	0.02599	224.06	411.66	1.0838	1.7238	1.236	0.840	1.357	565	161.3	175.3	12.43	85.9	10.95	8.78	20
22	0.96195	1202.3	0.02457	226.54	412.22	1.0921	1.7212	1.244	0.853	1.366	555	161.0	171.5	12.53	85.0	11.12	8.50	22
24	1.01600	1194.6	0.02324	229.04	412.77	1.1004	1.7187	1.252	0.866	1.375	546	160.6	167.7	12.63	84.1	11.30	8.22	24
26	1.07240	1186.7	0.02199	231.55	413.29	1.1086	1.7162	1.261	0.879	1.385	536	160.2	163.9	12.74	83.2	11.49	7.94	26
28	1.13090	1178.8	0.02082	234.08	413.79	1.1169	1.7136	1.271	0.893	1.396	527	159.7	160.3	12.84	82.3	11.69	7.66	28
30	1.19190	1170.7	0.01972	236.62	414.26	1.1252	1.7111	1.281	0.908	1.408	517	159.2	156.7	12.95	81.4	11.89	7.38	30
32	1.25520	1162.6	0.01869	239.19	414.71	1.1334	1.7086	1.291	0.924	1.420	507	158.7	153.1	13.06	80.5	12.10	7.11	32
34	1.32100	1154.3	0.01771	241.77	415.14	1.1417	1.7061	1.302	0.940	1.434	497	158.2	149.6	13.17	79.6	12.31	6.84	34
36	1.38920	1145.8	0.01679	244.38	415.54	1.1499	1.7036	1.314	0.957	1.448	487	157.6	146.1	13.28	78.7	12.54	6.57	36
38	1.46010	1137.3	0.01593	247.00	415.91	1.1582	1.7010	1.326	0.976	1.463	478	157.0	142.7	13.40	77.8	12.77	6.30	38
40	1.53360	1128.5	0.01511	249.65	416.25	1.1665	1.6985	1.339	0.995	1.480	468	156.4	139.4	13.52	76.9	13.02	6.04	40
42	1.60980	1119.6	0.01433	252.32	416.55	1.1747	1.6959	1.353	1.015	1.498	458	155.7	136.1	13.64	76.0	13.28	5.77	42
44	1.68870	1110.6	0.01360	255.01	416.83	1.1830	1.6933	1.368	1.037	1.517	448	155.0	132.8	13.77	75.1	13.55	5.51	44
46	1.77040	1101.4	0.01291	257.73	417.07	1.1913	1.6906	1.384	1.061	1.538	437	154.2	129.5	13.90	74.1	13.83	5.25	46
48	1.85510	1091.9	0.01226	260.47	417.27	1.1997	1.6879	1.401	1.086	1.561	427	153.4	126.3	14.04	73.2	14.13	5.00	48
50	1.94270	1082.3	0.01163	263.25	417.44	1.2080	1.6852	1.419	1.113	1.586	417	152.6	123.1	14.18	72.3	14.45	4.74	50
52	2.03330	1072.4	0.01104	266.05	417.56	1.2164	1.6824	1.439	1.142	1.614	407	151.7	120.0	14.32	71.4	14.78	4.49	52
54	2.12700	1062.3	0.01048	268.89	417.63	1.2248	1.6795	1.461	1.173	1.644	396	150.8	116.9	14.47	70.4	15.14	4.24	54
56	2.22390	1052.0	0.00995	271.76	417.66	1.2333	1.6766	1.485	1.208	1.677	386	149.8	113.8	14.63	69.5	15.52	4.00	56
58	2.32400	1041.3	0.00944	274.66	417.63	1.2418	1.6736	1.511	1.246	1.714	375	148.8	110.7	14.80	68.6	15.92	3.75	58
60	2.42750	1030.4	0.00896	277.61	417.55	1.2504	1.6705	1.539	1.287	1.755	364	147.7	107.6	14.98	67.6	16.36	3.51	60
65	2.70120	1001.4	0.00785	285.18	417.06	1.2722	1.6622	1.626	1.413	1.881	337	144.9	100.0	15.46	65.3	17.61	2.92	65
70	2.99740	969.7	0.00685	293.10	416.09	1.2945	1.6529	1.743	1.584	2.056	309	141.7	92.4	16.02	62.9	19.16	2.36	70
75	3.31770	934.4	0.00595	301.46	414.49	1.3177	1.6424	1.913	1.832	2.315	280	138.1	84.6	16.70	60.6	21.16	1.82	75
80	3.66380	893.7	0.00512	310.44	412.01	1.3423	1.6299	2.181	2.231	2.735	249	134.2	76.6	17.55	58.6	23.87	1.30	80
85	4.03780	844.8	0.00434	320.38	408.19	1.3690	1.6142	2.682	2.984	3.532	215	129.7	68.1	18.71	57.4	27.82	0.83	85
90	4.44230	780.1	0.00356	332.09	401.87	1.4001	1.5922	3.981	4.975	5.626	177	124.6	58.3	20.48	59.3	34.55	0.40	90
95	4.88240	662.9	0.00262	349.56	387.28	1.4462	1.5486	17.31	25.29	26.43	128	118.0	44.4	24.76	83.5	59.15	0.05	95
96.15[c]	4.99000	523.8	0.00191	366.90	366.90	1.4927	1.4927	∞	∞	∞	0	0.0			∞	∞	0.00	96.15

a نقطة ثلاثية   b درجة حرارة الغليان الطبيعية   c النقطة الحرجة

جدول أ-٢ خواص المبرد ٢٢ (R22) للبخار المحمص [NIST-Refprop8]

ضغط ٠,٠٥ ميغاباسكال (تشبع -٥٤,٨٣°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	1449.3	138.81	0.75168
sat.V	2.4348	381.10	1.8615
-50	2.3779	383.88	1.8741
-40	2.2690	389.71	1.8996
-30	2.1704	395.63	1.9245
-20	2.0805	401.65	1.9488
-10	1.9981	407.78	1.9725
0	1.9223	414.01	1.9957
10	1.8523	420.34	2.0185
20	1.7874	426.79	2.0409
30	1.7270	433.35	2.0629
40	1.6706	440.01	2.0845
50	1.6179	446.79	2.1058
60	1.5685	453.67	2.1268
70	1.5221	460.67	2.1475
80	1.4784	467.77	2.1679
90	1.4371	474.97	2.1880
100	1.3981	482.28	2.2078

ضغط ٠,١٠ ميغاباسكال (تشبع -٤١,٠٩°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	1410	153.70	0.81763
sat.V	4.6463	387.62	1.8257
-40	4.6216	388.28	1.8285
-30	4.4086	394.37	1.8541
-20	4.2167	400.54	1.8789
-10	4.0426	406.78	1.9031
0	3.8835	413.10	1.9267
10	3.7375	419.53	1.9498
20	3.6027	426.05	1.9724
30	3.4779	432.66	1.9946
40	3.3620	439.38	2.0164
50	3.2538	446.21	2.0379
60	3.1527	453.13	2.0590
70	3.0579	460.16	2.0798
80	2.9688	467.30	2.1003
90	2.8849	474.53	2.1205
100	2.8057	481.87	2.1404
110	2.7309	489.31	2.1601

ضغط ٠,١٥ ميغاباسكال (تشبع -٣٢,٠٨°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	الثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	1383.4	163.59	0.85929
sat.V	6.7902	391.76	1.8058
-30	6.7216	393.07	1.8112
-20	6.4134	399.38	1.8366
-10	6.1366	405.75	1.8613
0	5.8859	412.18	1.8853
10	5.6572	418.69	1.9087
20	5.4474	425.29	1.9316
30	5.2539	431.97	1.9540
40	5.0747	438.75	1.9760
50	4.9082	445.62	1.9976
60	4.7529	452.59	2.0188
70	4.6077	459.66	2.0397
80	4.4715	466.83	2.0603
90	4.3435	474.09	2.0806
100	4.2228	481.46	2.1006
110	4.1090	488.92	2.1204
120	4.0013	496.48	2.1398

ضغط ٠,٢٠ ميغاباسكال (تشبع -٢٥,١٨°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	1362.5	171.24	0.89045
sat.V	8.8982	394.83	1.7921
-20	8.6763	398.19	1.8055
-10	8.2842	404.69	1.8307
0	7.9322	411.24	1.8551
10	7.6134	417.84	1.8789
20	7.3227	424.52	1.9020
30	7.0558	431.27	1.9247
40	6.8097	438.10	1.9469
50	6.5818	445.03	1.9686
60	6.3698	452.04	1.9900
70	6.1719	459.15	2.0110
80	5.9868	466.35	2.0317
90	5.8131	473.65	2.0521
100	5.6497	481.04	2.0722
110	5.4957	488.53	2.0920
120	5.3502	496.11	2.1115
130	5.2125	503.78	2.1308

ضغط ٠,٢٥ ميغاباسكال (تشبع -١٩,٥١°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	1345	177.6	0.91565
sat.V	10.985	397.27	1.7817
-10	10.4890	403.60	1.8062
0	10.0250	410.27	1.8311
10	9.6082	416.98	1.8552
20	9.2301	423.73	1.8787
30	8.8848	430.56	1.9015
40	8.5677	437.45	1.9239
50	8.2750	444.43	1.9459
60	8.0036	451.49	1.9674
70	7.7509	458.63	1.9885
80	7.5150	465.87	2.0093
90	7.2941	473.20	2.0298
100	7.0865	480.62	2.0499
110	6.8912	488.13	2.0698
120	6.7069	495.73	2.0894
130	6.5326	503.43	2.1087
140	6.3676	511.22	2.1278

ضغط ٠,٣٠ ميغاباسكال (تشبع -١٤,٦٥°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	1329.7	183.09	0.93695
sat.V	13.058	399.31	1.7734
-10	12.7580	402.48	1.7855
0	12.1690	409.28	1.8109
10	11.6440	416.09	1.8354
20	11.1710	422.94	1.8592
30	10.7420	429.83	1.8823
40	10.3500	436.79	1.9049
50	9.9886	443.82	1.9270
60	9.6549	450.93	1.9486
70	9.3451	458.12	1.9699
80	9.0564	465.39	1.9908
90	8.7865	472.75	2.0113
100	8.5334	480.20	2.0316
110	8.2956	487.73	2.0515
120	8.0714	495.36	2.0712
130	7.8598	503.08	2.0905
140	7.6595	510.88	2.1097

ضغط ٠,٤٠ ميغاباسكال (تشبع -٦,٥٦°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	1303.4	192.37	0.97201
sat.V	17.187	402.56	1.7604
0	16.6210	407.21	1.7777
10	15.8480	414.26	1.8030
20	15.1620	421.30	1.8274
30	14.5460	428.35	1.8511
40	13.9890	435.44	1.8741
50	13.4800	442.59	1.8966
60	13.0120	449.79	1.9185
70	12.5800	457.07	1.9400
80	12.1800	464.41	1.9611
90	11.8070	471.84	1.9819
100	11.4580	479.35	2.0023
110	11.1320	486.94	2.0223
120	10.8250	494.61	2.0421
130	10.5350	502.37	2.0616
140	10.2620	510.21	2.0808
150	10.0040	518.14	2.0998

ضغط ٠,٥٠ ميغاباسكال (تشبع ٠,١٢°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	1281.1	200.15	1.0005
sat.V	21.312	405.09	1.7505
10	20.2500	412.33	1.7765
20	19.3110	419.59	1.8017
30	18.4800	426.82	1.8260
40	17.7350	434.06	1.8495
50	17.0610	441.33	1.8723
60	16.4460	448.63	1.8946
70	15.8810	456.00	1.9163
80	15.3600	463.42	1.9377
90	14.8760	470.92	1.9586
100	14.4260	478.48	1.9792
110	14.0050	486.13	1.9994
120	13.6110	493.85	2.0193
130	13.2400	501.65	2.0389
140	12.8910	509.53	2.0582
150	12.5610	517.50	2.0772
160	12.2480	525.54	2.0960

ضغط ٠,٦٠ ميغاباسكال (تشبع ٥,٨٦°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	1261.3	206.92	1.0248
sat.V	25.451	407.15	1.7424
10	24.8790	410.30	1.7536
20	23.6380	417.81	1.7797
30	22.5560	425.24	1.8046
40	21.5980	432.63	1.8286
50	20.7390	440.03	1.8519
60	19.9610	447.45	1.8745
70	19.2510	454.91	1.8965
80	18.5980	462.42	1.9181
90	17.9960	469.98	1.9392
100	17.4370	477.61	1.9599
110	16.9170	485.31	1.9803
120	16.4310	493.08	2.0003
130	15.9740	500.93	2.0200
140	15.5450	508.85	2.0395
150	15.1410	516.85	2.0586
160	14.7590	524.93	2.0775

جدول أ-٢ خواص المبرد ٢٢ (R22) للبخار المحمص [NIST-Refprop8] (مستمر)

ضغط ٠,٩٠ ميغاباسكال (تشبع ١٩,٦ °م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	1211.4	223.57	1.0822
sat.V	38.05	411.54	1.7243
20	37.9570	411.88	1.7254
30	35.8120	420.08	1.7529
40	34.0000	428.07	1.7788
50	32.4320	435.93	1.8036
60	31.0500	443.74	1.8273
70	29.8150	451.51	1.8503
80	28.7000	459.29	1.8727
90	27.6860	467.10	1.8945
100	26.7560	474.93	1.9158
110	25.8980	482.81	1.9366
120	25.1040	490.74	1.9570
130	24.3650	498.73	1.9771
140	23.6740	506.78	1.9968
150	23.0270	514.89	2.0162
160	22.4190	523.08	2.0353
170	21.8460	531.33	2.0542

ضغط ٠,٨٠ ميغاباسكال (تشبع ١٥,٤٨ °م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	1226.9	218.49	1.065
sat.V	33.812	410.31	1.7296
20	32.9270	413.97	1.7422
30	31.2020	421.87	1.7687
40	29.7170	429.64	1.7939
50	28.4150	437.34	1.8181
60	27.2560	445.00	1.8415
70	26.2130	452.67	1.8641
80	25.2650	460.35	1.8862
90	24.3980	468.07	1.9078
100	23.6010	475.84	1.9288
110	22.8620	483.65	1.9495
120	22.1760	491.53	1.9698
130	21.5360	499.47	1.9898
140	20.9370	507.48	2.0094
150	20.3740	515.55	2.0287
160	19.8440	523.70	2.0477
170	19.3440	531.92	2.0665

ضغط ٠,٧٠ ميغاباسكال (تشبع ١٠,٩٢ °م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	1243.4	212.98	1.046
sat.V	29.615	408.86	1.7356
20	28.1670	415.94	1.7601
30	26.7910	423.59	1.7858
40	25.5880	431.16	1.8103
50	24.5210	438.70	1.8340
60	23.5620	446.24	1.8570
70	22.6930	453.80	1.8794
80	21.8990	461.39	1.9012
90	21.1700	469.03	1.9225
100	20.4950	476.73	1.9434
110	19.8690	484.49	1.9639
120	19.2850	492.31	1.9841
130	18.7390	500.20	2.0039
140	18.2270	508.17	2.0234
150	17.7450	516.20	2.0426
160	17.2910	524.32	2.0616
170	16.8610	532.50	2.0803

ضغط ١,٤ ميغاباسكال (تشبع ٣٦,٣١ °م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	1144.5	244.78	1.1512
sat.V	60.041	415.6	1.7032
40	58.4570	419.09	1.7144
50	54.8010	428.16	1.7429
60	51.8010	436.86	1.7694
70	49.2560	445.34	1.7945
80	47.0470	453.70	1.8185
90	45.0960	461.98	1.8416
100	43.3530	470.22	1.8640
110	41.7780	478.44	1.8858
120	40.3430	486.67	1.9070
130	39.0280	494.93	1.9277
140	37.8140	503.21	1.9480
150	36.6890	511.54	1.9679
160	35.6420	519.91	1.9875
170	34.6640	528.33	2.0067
180	33.7460	536.80	2.0256
190	32.8830	545.33	2.0442

ضغط ١,٢ ميغاباسكال (تشبع ٣٠,٢٦ °م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	1169.7	236.96	1.1262
sat.V	51.064	414.32	1.7108
40	47.9590	422.94	1.7388
50	45.3330	431.44	1.7655
60	43.1040	439.73	1.7908
70	41.1660	447.90	1.8149
80	39.4550	456.00	1.8382
90	37.9240	464.07	1.8607
100	36.5400	472.14	1.8826
110	35.2790	480.22	1.9040
120	34.1220	488.33	1.9249
130	33.0550	496.47	1.9453
140	32.0650	504.66	1.9654
150	31.1430	512.89	1.9851
160	30.2820	521.19	2.0045
170	29.4740	529.54	2.0235
180	28.7140	537.95	2.0423
190	27.9980	546.42	2.0608

ضغط ١,٠٠ ميغاباسكال (تشبع ٢٣,٤٢ °م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	1196.8	228.3	1.098
sat.V	42.335	412.61	1.7194
30	40.6490	418.19	1.7380
40	38.4540	426.43	1.7648
50	36.5820	434.48	1.7901
60	34.9490	442.44	1.8143
70	33.5040	450.34	1.8377
80	32.2070	458.22	1.8603
90	31.0340	466.10	1.8824
100	29.9620	474.01	1.9038
110	28.9790	481.96	1.9248
120	28.0700	489.94	1.9454
130	27.2270	497.98	1.9656
140	26.4410	506.08	1.9855
150	25.7060	514.23	2.0050
160	25.0170	522.45	2.0241
170	24.3690	530.73	2.0431
180	23.7570	539.08	2.0617

ضغط ٢,٠ ميغاباسكال (تشبع ٥١,٢٧ °م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	1076.1	265.03	1.2134
satV	88.845	417.52	1.6834
60	82.4680	426.87	1.7119
70	76.8720	436.75	1.7411
80	72.3870	446.13	1.7680
90	68.6450	455.19	1.7933
100	65.4370	464.07	1.8174
110	62.6310	472.82	1.8406
120	60.1420	481.49	1.8629
130	57.9080	490.12	1.8846
140	55.8830	498.73	1.9057
150	54.0350	507.35	1.9263
160	52.3360	515.97	1.9465
170	50.7660	524.62	1.9662
180	49.3080	533.30	1.9856
190	47.9490	542.02	2.0046
200	46.6780	550.77	2.0233
210	45.4840	559.57	2.0417

ضغط ١,٨ ميغاباسكال (تشبع ٤٦,٧١ °م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	1098.1	258.69	1.1943
sat.V	78.89	417.15	1.6897
50	76.7290	420.60	1.7004
60	71.3010	430.49	1.7305
70	67.0070	439.80	1.7581
80	63.4510	448.78	1.7839
90	60.4170	457.54	1.8084
100	57.7740	466.18	1.8318
110	55.4350	474.74	1.8545
120	53.3390	483.26	1.8764
130	51.4440	491.76	1.8978
140	49.7160	500.25	1.9186
150	48.1290	508.76	1.9389
160	46.6650	517.30	1.9589
170	45.3060	525.87	1.9784
180	44.0400	534.48	1.9976
190	42.8570	543.13	2.0165
200	41.7460	551.83	2.0351

ضغط ١,٦ ميغاباسكال (تشبع ٤١,٧٥ °م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	1120.8	251.98	1.1737
sat.V	69.303	416.52	1.6962
50	65.1710	424.58	1.7215
60	61.1500	433.79	1.7496
70	57.8400	442.65	1.7758
80	55.0270	451.29	1.8006
90	52.5820	459.80	1.8244
100	50.4220	468.23	1.8472
110	48.4900	476.62	1.8694
120	46.7450	484.99	1.8910
130	45.1540	493.36	1.9120
140	43.6960	501.75	1.9326
150	42.3500	510.16	1.9527
160	41.1020	518.61	1.9724
170	39.9400	527.11	1.9918
180	38.8540	535.65	2.0109
190	37.8350	544.24	2.0296
200	36.8770	552.88	2.0481

جدول (أ-٢) خواص المبرد ٢٢ (R22) للبخار المحمص [NIST-Refprop8] (انتهى)

ضغط ٢,٢ ميغاباسكال (تشبع ٥٥,٥١°م)			
Temp °C	Density kg/m3	Enthalpy kJ/kg	Entropy kJ/kg.K
sat.L	1054.5	271.05	1.2312
sat.V	99.216	417.66	1.6773
60	94.9840	422.85	1.6930
70	87.5950	433.47	1.7244
80	81.9260	443.32	1.7527
90	77.3210	452.74	1.7790
100	73.4450	461.87	1.8038
110	70.1030	470.83	1.8275
120	67.1690	479.68	1.8503
130	64.5560	488.45	1.8724
140	62.2060	497.19	1.8938
150	60.0710	505.91	1.9146
160	58.1190	514.62	1.9350
170	56.3220	523.36	1.9549
180	54.6600	532.11	1.9744
190	53.1150	540.89	1.9936
200	51.6730	549.71	2.0124
210	50.3230	558.56	2.0310

ضغط ٢,٤ ميغاباسكال (تشبع ٥٩,٤٧°م)			
Temp °C	Density kg/m3	Enthalpy kJ/kg	Entropy kJ/kg.K
sat.L	1033.3	276.83	1.2482
sat.V	110.06	417.58	1.6713
60	109.410	418.24	1.6733
70	99.4030	429.89	1.7077
80	92.1800	440.34	1.7378
90	86.5090	450.16	1.7652
100	81.8410	459.59	1.7908
110	77.8770	468.79	1.8151
120	74.4370	477.82	1.8384
130	71.4030	486.75	1.8608
140	68.6920	495.61	1.8826
150	66.2460	504.44	1.9037
160	64.0190	513.26	1.9243
170	61.9790	522.08	1.9444
180	60.0980	530.90	1.9641
190	58.3560	539.75	1.9834
200	56.7340	548.63	2.0024
210	55.2200	557.54	2.0210

ضغط ٢,٦ ميغاباسكال (تشبع ٦٣,٢°م)			
Temp °C	Density kg/m3	Enthalpy kJ/kg	Entropy kJ/kg.K
sat.L	1012.1	282.42	1.2643
sat.V	121.44	417.29	1.6652
70	112.64	425.91	1.6906
80	103.31	437.14	1.7229
90	96.293	447.44	1.7517
100	90.671	457.22	1.7782
110	85.983	466.67	1.8032
120	81.967	475.91	1.8270
130	78.460	485.00	1.8499
140	75.352	494.01	1.8719
150	72.565	502.96	1.8933
160	70.042	511.88	1.9142
170	67.740	520.78	1.9345
180	65.626	529.69	1.9544
190	63.674	538.61	1.9738
200	61.862	547.55	1.9929
210	60.175	556.52	2.0117
220	58.596	565.52	2.0301

ضغط ٢,٨ ميغاباسكال (تشبع ٦٦,٧١°م)			
Temp °C	Density kg/m3	Enthalpy kJ/kg	Entropy kJ/kg.K
sat.L	990.93	287.85	1.2797
sat.V	133.44	416.79	1.6591
70	127.900	421.39	1.6726
80	115.520	433.66	1.7079
90	106.780	444.56	1.7383
100	99.9950	454.74	1.7660
110	94.4560	464.48	1.7917
120	89.7820	473.94	1.8161
130	85.7450	483.22	1.8394
140	82.1970	492.37	1.8618
150	79.0370	501.45	1.8835
160	76.1920	510.47	1.9046
170	73.6090	519.47	1.9251
180	71.2460	528.46	1.9452
190	69.0710	537.45	1.9648
200	67.0590	546.46	1.9841
210	65.1890	555.48	2.0030
220	63.4440	564.54	2.0215

ضغط ٣,٠ ميغاباسكال (تشبع ٧٠,٠٤°م)			
Temp °C	Density kg/m3	Enthalpy kJ/kg	Entropy kJ/kg.K
sat.L	969.46	293.16	1.2947
sat.V	146.16	416.08	1.6529
80	129.150	429.84	1.6924
90	118.100	441.49	1.7250
100	109.880	452.14	1.7539
110	103.340	462.21	1.7805
120	97.9070	471.92	1.8055
130	93.2720	481.39	1.8293
140	89.2370	490.71	1.8521
150	85.6690	499.91	1.8742
160	82.4750	509.05	1.8955
170	79.5900	518.14	1.9163
180	76.9610	527.22	1.9365
190	74.5500	536.28	1.9563
200	72.3270	545.36	1.9757
210	70.2650	554.44	1.9947
220	68.3460	563.55	2.0133
230	66.5520	572.69	2.0317

ضغط ٣,٥ ميغاباسكال (تشبع ٧٧,٦٨°م)			
Temp °C	Density kg/m3	Enthalpy kJ/kg	Entropy kJ/kg.K
sat.L	913.37	306.18	1.3307
sat.V	182.01	413.29	1.636
80	173.91	417.66	1.6484
90	151.55	432.66	1.6903
100	137.74	444.98	1.7238
110	127.69	456.12	1.7532
120	119.78	466.58	1.7802
130	113.28	476.62	1.8054
140	107.78	486.38	1.8293
150	103.01	495.95	1.8522
160	98.805	505.40	1.8743
170	95.060	514.76	1.8957
180	91.685	524.06	1.9164
190	88.619	533.32	1.9366
200	85.813	542.57	1.9564
210	83.229	551.81	1.9757
220	80.838	561.07	1.9947
230	78.615	570.33	2.0133

ضغط ٤,٠ ميغاباسكال (تشبع ٨٤,٥١°م)			
Temp °C	Density kg/m3	Enthalpy kJ/kg	Entropy kJ/kg.K
sat.L	850.11	319.35	1.3662
sat.V	226.65	406.64	1.6159
90	198.390	420.89	1.6499
100	172.110	436.50	1.6923
110	156.030	449.26	1.7261
120	144.400	460.74	1.7557
130	135.300	471.51	1.7827
140	127.840	481.81	1.8080
150	121.550	491.82	1.8319
160	116.110	501.61	1.8548
170	111.330	511.26	1.8768
180	107.070	520.81	1.8981
190	103.250	530.29	1.9188
200	99.7730	539.73	1.9390
210	96.5990	549.14	1.9587
220	93.6800	558.54	1.9779
230	90.9820	567.94	1.9968
240	88.4750	577.35	2.0153

ضغط ٤,٥ ميغاباسكال (تشبع ٩٠,٦٨°م)			
Temp °C	Density kg/m3	Enthalpy kJ/kg	Entropy kJ/kg.K
sat.L	769.08	333.93	1.4049
sat.V	289.55	400.66	1.5884
100	218.410	425.67	1.6564
110	190.260	441.32	1.6978
120	172.630	454.28	1.7312
130	159.790	465.99	1.7606
140	149.720	476.97	1.7875
150	141.460	487.48	1.8126
160	134.490	497.67	1.8365
170	128.460	507.65	1.8592
180	123.170	517.48	1.8812
190	118.470	527.20	1.9024
200	114.230	536.84	1.9230
210	110.390	546.43	1.9430
220	106.880	555.99	1.9626
230	103.660	565.53	1.9818
240	100.680	575.06	2.0005
250	97.9120	584.60	2.0189

ضغط ٥,٠ ميغاباسكال			
Temp °C	Density kg/m3	Enthalpy kJ/kg	Entropy kJ/kg.K
100	296.59	408.94	1.6062
110	234.11	431.69	1.6664
120	205.85	447.00	1.7059
130	187.40	459.98	1.7385
140	173.75	471.80	1.7675
150	162.96	482.92	1.7941
160	154.08	493.58	1.8190
170	146.55	503.93	1.8426
180	140.04	514.06	1.8652
190	134.31	524.03	1.8870
200	129.21	533.89	1.9080
210	124.63	543.67	1.9285
220	120.46	553.40	1.9484
230	116.66	563.09	1.9679
240	113.16	572.75	1.9869
250	109.92	582.41	2.0055



شكل أ-١ خريطة الضغط-الإنثالبي لمبرد R-22 [ASHRAE 2009]

جدول أ-٣ الخواص الثيرموديناميكية لمبرد R-134a لسائل وبخار مشبع [ASHRAE 2009].

درجة الحرارة °م	الضغط ميغاباسكال	الكثافة كجم/م³ سائل	الحجم النوعي م³/كجم بخار	الإنثالبي كجول/كجم سائل	الإنثالبي كجول/كجم بخار	الإنتروبي كجول/كجم.كلفن سائل	الإنتروبي كجول/كجم.كلفن بخار	الحرارة النوعية كجول/كجم.كلفن سائل	الحرارة النوعية كجول/كجم.كلفن بخار	c_p/c_v بخار	سرعة الصوت م/ث سائل	سرعة الصوت م/ث بخار	اللزوجة مايكروباسكال.ث سائل	اللزوجة مايكروباسكال.ث بخار	الموصلية الحرارية ملي وات/(م.كلفن) سائل	الموصلية الحرارية ملي وات/(م.كلفن) بخار	التوتر السطحي ملي نيوتن/م	درجة الحرارة °م
-103.30[a]	0.00039	1591.1	35.4960	71.46	334.94	0.4126	1.9639	1.184	0.585	1.164	1120	126.8	2175.0	6.46	145.2	3.08	28.07	-103.30
-100	0.00056	1582.4	25.1930	75.36	336.85	0.4354	1.9456	1.184	0.593	1.162	1103	127.9	1893.0	6.60	143.2	3.34	27.50	100
-90	0.00152	1555.8	9.7698	87.23	342.76	0.5020	1.8972	1.189	0.617	1.156	1052	131.0	1339.0	7.03	137.3	4.15	25.79	-90
-80	0.00367	1529.0	4.2682	99.16	348.83	0.5654	1.8580	1.198	0.642	1.151	1002	134.0	1018.0	7.46	131.5	4.95	24.10	-80
-70	0.00798	1501.9	2.0590	111.20	355.02	0.6262	1.8264	1.210	0.667	1.148	952	136.8	809.2	7.89	126.0	5.75	22.44	70
-60	0.01591	1474.3	1.0790	123.36	361.31	0.6846	1.8010	1.223	0.692	1.146	903	139.4	663.1	8.30	120.7	6.56	20.80	-60
-50	0.02945	1446.3	0.60620	135.67	367.65	0.7410	1.7806	1.238	0.720	1.146	855	141.7	555.1	8.72	115.6	7.36	19.18	-50
-40	0.05121	1417.7	0.36108	148.14	374.00	0.7956	1.7643	1.255	0.749	1.148	807	143.6	472.2	9.12	110.6	8.17	17.60	40
-30	0.08438	1388.4	0.22594	160.79	380.32	0.8486	1.7515	1.273	0.781	1.152	760	145.2	406.4	9.52	105.8	8.99	16.04	-30
-28	0.09270	1382.4	0.20680	163.34	381.57	0.8591	1.7492	1.277	0.788	1.153	751	145.4	394.9	9.60	104.8	9.15	15.73	28
-26.07[b]	0.10133	1376.7	0.19018	165.81	382.78	0.8690	1.7472	1.281	0.794	1.154	742	145.7	384.2	9.68	103.9	9.31	15.44	26.07
-26	0.10167	1376.5	0.18958	165.90	382.82	0.8694	1.7471	1.281	0.794	1.154	742	145.7	383.8	9.68	103.9	9.32	15.43	-26
24	0.11130	1370.4	0.17407	168.47	384.07	0.8798	1.7451	1.285	0.801	1.155	732	145.9	373.1	9.77	102.9	9.48	15.12	24
-22	0.12165	1364.4	0.16006	171.05	385.32	0.8900	1.7432	1.289	0.809	1.156	723	146.1	362.9	9.85	102.0	9.65	14.82	22
-20	0.13273	1358.3	0.14739	173.64	386.55	0.9002	1.7413	1.293	0.816	1.158	714	146.3	353.0	9.92	101.1	9.82	14.51	-20
-18	0.14460	1352.1	0.13592	176.23	387.79	0.9104	1.7396	1.297	0.823	1.159	705	146.4	343.5	10.01	100.1	9.98	14.21	18
-16	0.15728	1345.9	0.12551	178.83	389.02	0.9205	1.7379	1.302	0.831	1.161	695	146.6	334.3	10.09	99.2	10.15	13.91	16
-14	0.17082	1339.7	0.11605	181.44	390.24	0.9306	1.7363	1.306	0.838	1.163	686	146.7	325.4	10.17	98.3	10.32	13.61	-14
-12	0.18524	1333.4	0.10744	184.07	391.46	0.9407	1.7348	1.311	0.846	1.165	677	146.8	316.9	10.25	97.4	10.49	13.32	12
-10	0.20060	1327.1	0.09959	186.70	392.66	0.9506	1.7334	1.316	0.854	1.167	668	146.9	308.6	10.33	96.5	10.66	13.02	10
-8	0.21693	1320.8	0.09242	189.34	393.87	0.9606	1.7320	1.320	0.863	1.169	658	146.9	300.6	10.41	95.6	10.83	12.72	-8
-6	0.23428	1314.3	0.08587	191.99	395.06	0.9705	1.7307	1.325	0.871	1.171	649	147.0	292.9	10.49	94.7	11.00	12.43	6
-4	0.25268	1307.9	0.07987	194.65	396.25	0.9804	1.7294	1.330	0.880	1.174	640	147.0	285.4	10.57	93.8	11.17	12.14	4
-2	0.27217	1301.4	0.07436	197.32	397.43	0.9902	1.7282	1.336	0.888	1.176	631	147.0	278.1	10.65	92.9	11.34	11.85	-2
0	0.29280	1294.8	0.06931	200.00	398.60	1.0000	1.7271	1.341	0.897	1.179	622	146.9	271.1	10.73	92.0	11.51	11.56	0
2	0.31462	1288.1	0.06466	202.69	399.77	1.0098	1.7260	1.347	0.906	1.182	612	146.9	264.3	10.81	91.1	11.69	11.27	2
4	0.33760	1281.4	0.06039	205.40	400.92	1.0195	1.7250	1.352	0.916	1.185	603	146.8	257.6	10.90	90.2	11.86	10.99	4
6	0.36198	1274.7	0.05644	208.11	402.06	1.0292	1.7240	1.358	0.925	1.189	594	146.7	251.2	10.98	89.4	12.04	10.70	6
8	0.38761	1267.9	0.05280	210.84	403.20	1.0388	1.7230	1.364	0.935	1.192	585	146.5	244.9	11.06	88.5	12.22	10.42	8
10	0.41461	1261.0	0.04944	213.58	404.32	1.0485	1.7221	1.370	0.945	1.196	576	146.4	238.8	11.15	87.6	12.40	10.14	10
12	0.44301	1254.0	0.04633	216.33	405.43	1.0581	1.7212	1.377	0.956	1.200	566	146.2	232.9	11.23	86.7	12.58	9.86	12
14	0.47288	1246.9	0.04345	219.09	406.53	1.0677	1.7204	1.383	0.967	1.204	557	146.0	227.1	11.32	85.9	12.77	9.58	14
16	0.50425	1239.8	0.04078	221.87	407.61	1.0772	1.7196	1.390	0.978	1.209	548	145.7	221.5	11.40	85.0	12.95	9.30	16
18	0.53718	1232.6	0.03830	224.66	408.69	1.0867	1.7188	1.397	0.989	1.214	539	145.5	216.0	11.49	84.1	13.14	9.03	18
20	0.57171	1225.3	0.03600	227.47	409.75	1.0962	1.7180	1.405	1.001	1.219	530	145.1	210.7	11.58	83.3	13.33	8.76	20
22	0.60789	1218.0	0.03385	230.29	410.79	1.1057	1.7173	1.413	1.013	1.224	520	144.8	205.5	11.67	82.4	13.53	8.48	22
24	0.64578	1210.5	0.03186	233.12	411.82	1.1152	1.7166	1.421	1.025	1.230	511	144.5	200.4	11.76	81.6	13.72	8.21	24
26	0.68543	1202.9	0.03000	235.97	412.84	1.1246	1.7159	1.429	1.038	1.236	502	144.1	195.4	11.85	80.7	13.92	7.95	26
28	0.72688	1195.2	0.02826	238.84	413.84	1.1341	1.7152	1.437	1.052	1.243	493	143.6	190.5	11.95	79.8	14.13	7.68	28
30	0.77020	1187.5	0.02664	241.72	414.82	1.1435	1.7145	1.446	1.065	1.249	483	143.2	185.8	12.04	79.0	14.33	7.42	30
32	0.81543	1179.6	0.02513	244.62	415.78	1.1529	1.7138	1.456	1.080	1.257	474	142.7	181.1	12.14	78.1	14.54	7.15	32
34	0.86263	1171.6	0.02371	247.54	416.72	1.1623	1.7131	1.466	1.095	1.265	465	142.1	176.6	12.24	77.3	14.76	6.89	34
36	0.91185	1163.4	0.02238	250.48	417.65	1.1717	1.7124	1.476	1.111	1.273	455	141.6	172.1	12.34	76.4	14.98	6.64	36
38	0.96315	1155.1	0.02113	253.43	418.55	1.1811	1.7118	1.487	1.127	1.282	446	141.0	167.7	12.44	75.6	15.21	6.38	38
40	1.0166	1146.7	0.01997	256.41	419.43	1.1905	1.7111	1.498	1.145	1.292	436	140.3	163.4	12.55	74.7	15.44	6.13	40
42	1.0722	1138.2	0.01887	259.41	420.28	1.1999	1.7103	1.510	1.163	1.303	427	139.7	159.2	12.65	73.9	15.68	5.88	42
44	1.1301	1129.5	0.01784	262.43	421.11	1.2092	1.7096	1.523	1.182	1.314	418	138.9	155.1	12.76	73.0	15.93	5.63	44
46	1.1903	1120.6	0.01687	265.47	421.92	1.2186	1.7089	1.537	1.202	1.326	408	138.2	151.0	12.88	72.1	16.18	5.38	46
48	1.2529	1111.5	0.01595	268.53	422.69	1.2280	1.7081	1.551	1.223	1.339	399	137.4	147.0	13.00	71.3	16.45	5.13	48
50	1.3179	1102.3	0.01509	271.62	423.44	1.2375	1.7072	1.566	1.246	1.354	389	136.6	143.1	13.12	70.4	16.72	4.89	50
52	1.3854	1092.9	0.01428	274.74	424.15	1.2469	1.7064	1.582	1.270	1.369	379	135.7	139.2	13.24	69.6	17.01	4.65	52
54	1.4555	1083.2	0.01351	277.89	424.83	1.2563	1.7055	1.600	1.296	1.386	370	134.7	135.4	13.37	68.7	17.31	4.41	54
56	1.5282	1073.4	0.01278	281.06	425.47	1.2658	1.7045	1.618	1.324	1.405	360	133.8	131.6	13.51	67.8	17.63	4.18	56
58	1.6036	1063.2	0.01209	284.27	426.07	1.2753	1.7035	1.638	1.354	1.425	350	132.7	127.9	13.65	67.0	17.96	3.95	58
60	1.6818	1052.9	0.01144	287.50	426.63	1.2848	1.7024	1.660	1.387	1.448	340	131.7	124.2	13.79	66.1	18.31	3.72	60
62	1.7628	1042.2	0.01083	290.78	427.14	1.2944	1.7013	1.684	1.422	1.473	331	130.5	120.6	13.95	65.2	18.68	3.49	62
64	1.8467	1031.2	0.01024	294.09	427.61	1.3040	1.7000	1.710	1.461	1.501	321	129.4	117.0	14.11	64.3	19.07	3.27	64
66	1.9337	1020.0	0.00969	297.44	428.02	1.3137	1.6987	1.738	1.504	1.532	311	128.1	113.5	14.28	63.4	19.50	3.05	66
68	2.0237	1008.3	0.00916	300.84	428.36	1.3234	1.6972	1.769	1.552	1.567	301	126.8	109.9	14.46	62.6	19.95	2.83	68
70	2.1168	996.2	0.00865	304.28	428.65	1.3332	1.6956	1.804	1.605	1.607	290	125.5	106.4	14.65	61.7	20.45	2.61	70
72	2.2132	983.8	0.00817	307.78	428.86	1.3430	1.6939	1.843	1.665	1.653	280	124.0	102.9	14.85	60.8	20.98	2.40	72
74	2.3130	970.8	0.00771	311.33	429.00	1.3530	1.6920	1.887	1.734	1.705	269	122.6	99.5	15.07	59.9	21.56	2.20	74
76	2.4161	957.3	0.00727	314.94	429.04	1.3631	1.6899	1.938	1.812	1.766	259	121.0	96.0	15.30	59.0	22.21	1.99	76
78	2.5228	943.1	0.00685	318.63	428.98	1.3733	1.6876	1.996	1.904	1.838	248	119.4	92.5	15.56	58.1	22.92	1.80	78
80	2.6332	928.2	0.00645	322.39	428.81	1.3836	1.6850	2.065	2.012	1.924	237	117.7	89.0	15.84	57.2	23.72	1.60	80
85	2.9258	887.2	0.00550	332.22	427.76	1.4104	1.6771	2.306	2.397	2.232	207	113.1	80.2	16.67	54.9	26.22	1.14	85
90	3.2442	837.8	0.00461	342.93	425.42	1.4390	1.6662	2.756	3.121	2.820	176	107.9	70.9	17.81	52.8	29.91	0.71	90
95	3.5912	772.7	0.00374	355.25	420.67	1.4715	1.6492	3.938	5.020	4.369	141	101.9	60.4	19.61	51.7	36.40	0.33	95
100	3.9724	651.2	0.00266	373.30	407.66	1.5188	1.6109	17.59	25.35	20.81	101	94.0	45.1	24.21	59.9	60.58	0.04	100
101.06[c]	4.0593	511.9	0.00195	389.64	389.64	1.5621	1.5621	∞	∞	∞	0	0.0			∞	∞	0.00	101.06

النقطة الثلاثية [a]   درجة حرارة الغليان الطبيعية [b]   النقطة الحرجة [c]

جدول أ-٤ خواص المبرد ١٣٤أ (R134a) للبخار المحمص [NIST-Refprop8]

ضغط ٠,٠٥ ميغاباسكال (تشبع -٤٠,٤٥°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	1419	147.57	0.79317
sat.V	2.7082	373.71	1.765
-40	2.7023	374.05	1.7665
-30	2.5800	381.58	1.7980
-20	2.4699	389.21	1.8288
-10	2.3697	396.99	1.8590
0	2.2780	404.92	1.8885
10	2.1937	413.02	1.9176
20	2.1157	421.27	1.9463
30	2.0433	429.69	1.9745
40	1.9759	438.28	2.0024
50	1.9130	447.03	2.0299
60	1.8541	455.94	2.0571
70	1.7989	465.02	2.0839
80	1.7469	474.26	2.1105
90	1.6979	483.67	2.1367
100	1.6516	493.24	2.1627
110	1.6079	502.96	2.1884

ضغط ٠,١٠ ميغاباسكال (تشبع -٢٦,٣٦°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	1377.5	165.44	0.86756
sat.V	5.1932	382.6	1.7475
-20	5.0401	387.65	1.7677
-10	4.8208	395.64	1.7986
0	4.6232	403.73	1.8288
10	4.4433	411.95	1.8584
20	4.2784	420.31	1.8874
30	4.1265	428.82	1.9160
40	3.9860	437.49	1.9441
50	3.8554	446.30	1.9718
60	3.7336	455.28	1.9991
70	3.6198	464.41	2.0261
80	3.5130	473.70	2.0528
90	3.4126	483.14	2.0792
100	3.3181	492.74	2.1053
110	3.2288	502.50	2.1311
120	3.1444	512.42	2.1566
130	3.0644	522.49	2.1819

ضغط ٠,١٥ ميغاباسكال (تشبع -١٧,١٣°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	1349.4	177.36	0.91482
sat.V	7.6172	388.32	1.7388
-10	7.3629	394.21	1.7615
0	7.0416	402.49	1.7924
10	6.7531	410.86	1.8225
20	6.4913	419.33	1.8519
30	6.2520	427.94	1.8808
40	6.0318	436.68	1.9091
50	5.8283	445.57	1.9371
60	5.6394	454.60	1.9646
70	5.4634	463.79	1.9918
80	5.2989	473.12	2.0186
90	5.1446	482.61	2.0451
100	4.9997	492.25	2.0713
110	4.8631	502.04	2.0971
120	4.7341	511.98	2.1228
130	4.6121	522.08	2.1481
140	4.4965	532.33	2.1732

ضغط ٠,٢٠ ميغاباسكال (تشبع -١٠,٠٨°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	1327.4	186.6	0.95027
sat.V	10.012	392.62	1.7334
-10	10.0090	392.68	1.7337
0	9.5410	401.20	1.7654
10	9.1281	409.73	1.7961
20	8.7577	418.33	1.8259
30	8.4220	427.04	1.8551
40	8.1152	435.87	1.8838
50	7.8331	444.83	1.9120
60	7.5725	453.92	1.9397
70	7.3305	463.16	1.9670
80	7.1051	472.54	1.9939
90	6.8944	482.07	2.0206
100	6.6967	491.75	2.0468
110	6.5109	501.57	2.0728
120	6.3359	511.55	2.0985
130	6.1705	521.67	2.1239
140	6.0140	531.94	2.1491

ضغط ٠,٢٥ ميغاباسكال (تشبع -٤,٢٨°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	1308.8	194.27	0.97898
sat.V	12.394	396.08	1.7296
0	12.1310	399.83	1.7434
10	11.5740	408.55	1.7748
20	11.0820	417.30	1.8051
30	10.6390	426.12	1.8347
40	10.2380	435.04	1.8637
50	9.8712	444.07	1.8921
60	9.5339	453.23	1.9200
70	9.2220	462.53	1.9475
80	8.9323	471.96	1.9746
90	8.6622	481.53	2.0013
100	8.4097	491.25	2.0277
110	8.1727	501.11	2.0537
120	7.9498	511.11	2.0795
130	7.7396	521.26	2.1050
140	7.5410	531.56	2.1302
150	7.3530	542.00	2.1552

ضغط ٠,٣٠ ميغاباسكال (تشبع ٠,٦٧٢°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	1292.6	200.9	1.0033
sat.V	14.77	399	1.7267
10	14.0960	407.34	1.7567
20	13.4670	416.24	1.7876
30	12.9070	425.17	1.8175
40	12.4020	434.19	1.8468
50	11.9440	443.31	1.8755
60	11.5250	452.53	1.9036
70	11.1380	461.89	1.9312
80	10.7810	471.37	1.9585
90	10.4490	480.99	1.9853
100	10.1390	490.74	2.0118
110	9.8486	500.63	2.0380
120	9.5762	510.67	2.0638
130	9.3197	520.85	2.0894
140	9.0777	531.17	2.1147
150	8.8489	541.64	2.1397
160	8.6321	552.25	2.1645

ضغط ٠,٤ ميغاباسكال (تشبع ٨,٩٣°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	1264.7	212.11	1.0433
sat.V	19.529	403.72	1.7226
10	19.4150	404.72	1.7261
20	18.4460	414.01	1.7584
30	17.6070	423.22	1.7893
40	16.8650	432.45	1.8192
50	16.2010	441.74	1.8484
60	15.6000	451.11	1.8770
70	15.0500	460.58	1.9050
80	14.5460	470.17	1.9325
90	14.0800	479.88	1.9597
100	13.6470	489.72	1.9864
110	13.2440	499.68	2.0127
120	12.8670	509.78	2.0387
130	12.5130	520.02	2.0645
140	12.1810	530.39	2.0899
150	11.8670	540.91	2.1150
160	11.5700	551.56	2.1399

ضغط ٠,٥ ميغاباسكال (تشبع ١٥,٧٤°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	1240.8	221.5	1.0759
sat.V	24.317	407.47	1.7197
20	23.7440	411.61	1.7339
30	22.5540	421.16	1.7659
40	21.5260	430.63	1.7967
50	20.6190	440.11	1.8265
60	19.8080	449.64	1.8555
70	19.0740	459.25	1.8839
80	18.4060	468.95	1.9118
90	17.7920	478.76	1.9392
100	17.2250	488.68	1.9661
110	16.7000	498.72	1.9927
120	16.2110	508.88	2.0189
130	15.7530	519.18	2.0447
140	15.3240	529.60	2.0703
150	14.9210	540.17	2.0955
160	14.5400	550.86	2.1205
170	14.1800	561.70	2.1453

ضغط ٠,٦ ميغاباسكال (تشبع ٢١,٥٨°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	1219.5	229.68	1.1037
sat.V	29.155	410.57	1.7175
30	27.7900	418.96	1.7455
40	26.4090	428.73	1.7772
50	25.2150	438.43	1.8077
60	24.1610	448.13	1.8373
70	23.2180	457.88	1.8661
80	22.3660	467.70	1.8943
90	21.5890	477.61	1.9220
100	20.8770	487.62	1.9492
110	20.2190	497.74	1.9759
120	19.6090	507.97	2.0023
130	19.0400	518.33	2.0283
140	18.5090	528.81	2.0540
150	18.0110	539.42	2.0794
160	17.5420	550.16	2.1045
170	17.1000	561.04	2.1293
180	16.6820	572.04	2.1539

جدول أ-٤ خواص المبرد ١٣٤أ (R134a) للبخار المحمص [NIST-Refprop8] (مستمر)

ضغط ٠,٧ ميغاباسكال (تشبع ٢٦,٧١°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	1200.2	236.99	1.128
sat.V	34.054	413.2	1.7156
30	33.371	416.60	1.7269
40	31.549	426.72	1.7598
50	30.010	436.67	1.7910
60	28.674	446.57	1.8212
70	27.493	456.47	1.8505
80	26.435	466.42	1.8791
90	25.478	476.44	1.9070
100	24.605	486.54	1.9345
110	23.804	496.74	1.9615
120	23.064	507.05	1.9880
130	22.377	517.47	2.0142
140	21.737	528.01	2.0400
150	21.139	538.67	2.0655
160	20.577	549.45	2.0907
170	20.049	560.37	2.1156
180	19.550	571.42	2.1403

ضغط ٠,٨ ميغاباسكال (تشبع ٣١,٣٣°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	1182.2	243.65	1.1497
sat.V	39.025	415.46	1.714
40	36.988	424.59	1.7436
50	35.030	434.84	1.7758
60	33.363	444.95	1.8067
70	31.908	455.03	1.8365
80	30.619	465.12	1.8654
90	29.462	475.25	1.8937
100	28.414	485.45	1.9214
110	27.457	495.74	1.9486
120	26.578	506.12	1.9754
130	25.764	516.60	2.0017
140	25.009	527.20	2.0277
150	24.305	537.91	2.0533
160	23.646	548.74	2.0786
170	23.027	559.70	2.1036
180	22.445	570.78	2.1283
190	21.894	582.00	2.1528

ضغط ٠,٩ ميغاباسكال (تشبع ٣٥,٥٣°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	1165.4	249.78	1.1695
sat.V	44.078	417.43	1.7126
40	42.7810	422.32	1.7283
50	40.3070	432.92	1.7616
60	38.2470	443.28	1.7932
70	36.4780	453.54	1.8236
80	34.9280	463.78	1.8530
90	33.5500	474.03	1.8816
100	32.3090	484.34	1.9096
110	31.1830	494.71	1.9370
120	30.1530	505.17	1.9640
130	29.2050	515.72	1.9905
140	28.3270	526.38	2.0166
150	27.5110	537.14	2.0423
160	26.7500	548.02	2.0678
170	26.0360	559.02	2.0929
180	25.3660	570.15	2.1177
190	24.7340	581.39	2.1422

ضغط ١,٠ ميغاباسكال (تشبع ٣٩,٣٩°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	1149.3	255.5	1.1876
sat.V	49.222	419.16	1.7113
40	49.004	419.86	1.7135
50	45.879	430.88	1.7482
60	43.350	441.53	1.7806
70	41.218	452.00	1.8116
80	39.372	462.40	1.8414
90	37.746	472.79	1.8705
100	36.295	483.21	1.8988
110	34.985	493.67	1.9264
120	33.792	504.21	1.9536
130	32.699	514.83	1.9803
140	31.692	525.55	2.0065
150	30.758	536.37	2.0324
160	29.889	547.30	2.0579
170	29.076	558.35	2.0831
180	28.314	569.51	2.1080
190	27.598	580.79	2.1327

ضغط ١,٢ ميغاباسكال (تشبع ٤٦,٣٢°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	1119.2	265.95	1.2201
sat.V	59.815	422.04	1.7087
50	58.136	426.41	1.7223
60	54.335	437.79	1.7570
70	51.276	448.76	1.7895
80	48.710	459.53	1.8204
90	46.499	470.22	1.8502
100	44.558	480.87	1.8792
110	42.830	491.54	1.9074
120	41.275	502.25	1.9350
130	39.862	513.03	1.9621
140	38.569	523.87	1.9886
150	37.379	534.81	2.0148
160	36.277	545.84	2.0405
170	35.252	556.97	2.0660
180	34.295	568.22	2.0911
190	33.399	579.57	2.1158
200	32.556	591.05	2.1403

ضغط ١,٤ ميغاباسكال (تشبع ٥٢,٤٢°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	1090.9	275.4	1.2489
sat.V	70.87	424.3	1.7062
60	66.6430	433.62	1.7345
70	62.2670	445.25	1.7689
80	58.7450	456.48	1.8012
90	55.7940	467.52	1.8320
100	53.2540	478.45	1.8617
110	51.0280	489.34	1.8905
120	49.0490	500.24	1.9186
130	47.2690	511.17	1.9460
140	45.6530	522.16	1.9730
150	44.1770	533.21	1.9994
160	42.8170	544.35	2.0254
170	41.5600	555.58	2.0510
180	40.3920	566.91	2.0763
190	39.3010	578.34	2.1013
200	38.2790	589.89	2.1259
210	37.3190	601.54	2.1503

ضغط ١,٦ ميغاباسكال (تشبع ٥٧,٩١°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	1063.7	284.11	1.2748
sat.V	82.464	426.04	1.7036
60	80.824	428.84	1.7120
70	74.458	441.40	1.7491
80	69.628	453.22	1.7831
90	65.722	464.66	1.8150
100	62.443	475.91	1.8456
110	59.619	487.06	1.8751
120	57.143	498.16	1.9037
130	54.941	509.27	1.9316
140	52.960	520.40	1.9589
150	51.162	531.59	1.9856
160	49.519	542.84	2.0119
170	48.007	554.17	2.0378
180	46.608	565.59	2.0632
190	45.307	577.10	2.0884
200	44.093	588.71	2.1132
210	42.957	600.44	2.1377

ضغط ١,٨ ميغاباسكال (تشبع ٦٣,٠٠°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	1037.3	292.26	1.2987
sat.V	94.682	427.36	1.7007
70	88.2740	437.07	1.7293
80	81.5700	449.67	1.7655
90	76.4050	461.63	1.7989
100	72.1980	473.25	1.8305
110	68.6510	484.68	1.8607
120	65.5900	496.02	1.8899
130	62.9000	507.32	1.9183
140	60.5040	518.61	1.9460
150	58.3480	529.93	1.9731
160	56.3890	541.30	1.9996
170	54.5970	552.74	2.0257
180	52.9480	564.25	2.0514
190	51.4210	575.84	2.0767
200	50.0010	587.53	2.1017
210	48.6760	599.32	2.1263
220	47.4340	611.21	2.1507

ضغط ٢,٠ ميغاباسكال (تشبع ٦٧,٤٨°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	1011.4	299.95	1.3209
satV	107.63	428.28	1.6976
70	104.4600	432.06	1.7086
80	94.8860	445.77	1.7481
90	88.0030	458.38	1.7833
100	82.6120	470.45	1.8160
110	78.1820	482.21	1.8471
120	74.4260	493.80	1.8770
130	71.1710	505.31	1.9059
140	68.3040	516.78	1.9340
150	65.7450	528.24	1.9614
160	63.4370	539.74	1.9883
170	61.3390	551.28	2.0146
180	59.4170	562.89	2.0405
190	57.6460	574.57	2.0660
200	56.0050	586.34	2.0912
210	54.4780	598.20	2.1160
220	53.0520	610.15	2.1405

جدول أ-٤ خواص المبرد ١٣٤أ (R134a) للبخار المحمص [NIST-Refprop8] (أنتهى)

ضغط ٢,٢ ميغاباسكال (تشبع ٧١,٧٣°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م٣	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	985.47	307.3	1.3417
sat.V	121.42	428.84	1.6941
80	110.070	441.40	1.7301
90	100.740	454.87	1.7677
100	93.8050	467.48	1.8020
110	88.2810	479.62	1.8341
120	83.6960	491.50	1.8647
130	79.7840	503.24	1.8942
140	76.3790	514.89	1.9228
150	73.3670	526.52	1.9506
160	70.6730	538.15	1.9777
170	68.2380	549.81	2.0043
180	66.0200	561.52	2.0305
190	63.9850	573.29	2.0562
200	62.1080	585.13	2.0815
210	60.3670	597.06	2.1064
220	58.7450	609.08	2.1310
230	57.2290	621.20	2.1554

ضغط ٢,٤ ميغاباسكال (تشبع ٧٥,٩٢°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م٣	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	959.38	314.38	1.3615
sat.V	136.24	429.04	1.6902
80	128.02	436.31	1.7109
90	114.95	451.02	1.7520
100	105.93	464.31	1.7881
110	99.035	476.91	1.8214
120	93.452	489.12	1.8529
130	88.772	501.11	1.8830
140	84.750	512.97	1.9121
150	81.230	524.76	1.9403
160	78.106	536.53	1.9678
170	75.302	548.31	1.9947
180	72.762	560.13	2.0210
190	70.443	571.99	2.0469
200	68.312	583.92	2.0724
210	66.342	595.92	2.0975
220	64.514	608.00	2.1223
230	62.809	620.18	2.1467

ضغط ٢,٦ ميغاباسكال (تشبع ٧٩,٤١°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م٣	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	932.74	321.26	1.3805
sat.V	152.28	428.88	1.6858
80	150.61	430.04	1.6891
90	131.14	446.72	1.7357
100	119.21	460.90	1.7742
110	110.55	474.04	1.8090
120	103.76	486.63	1.8414
130	98.171	498.90	1.8722
140	93.442	510.99	1.9018
150	89.349	522.96	1.9305
160	85.748	534.88	1.9583
170	82.539	546.79	1.9855
180	79.648	558.72	2.0121
190	77.022	570.68	2.0382
200	74.620	582.69	2.0639
210	72.408	594.77	2.0891
220	70.360	606.92	2.1140
230	68.456	619.16	2.1386

ضغط ٢,٨ ميغاباسكال (تشبع ٨٢,٩٠°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م٣	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	905.19	328.01	1.399
sat.V	169.84	428.33	1.6807
90	150.190	441.77	1.7181
100	133.950	457.19	1.7600
110	122.970	471.01	1.7966
120	114.680	484.04	1.8301
130	108.020	496.62	1.8618
140	102.480	508.95	1.8920
150	97.7410	521.12	1.9211
160	93.6100	533.21	1.9493
170	89.9560	545.25	1.9768
180	86.6840	557.29	2.0037
190	83.7280	569.35	2.0300
200	81.0340	581.45	2.0558
210	78.5640	593.61	2.0813
220	76.2840	605.83	2.1063
230	74.1700	618.13	2.1310
240	72.2020	630.52	2.1554

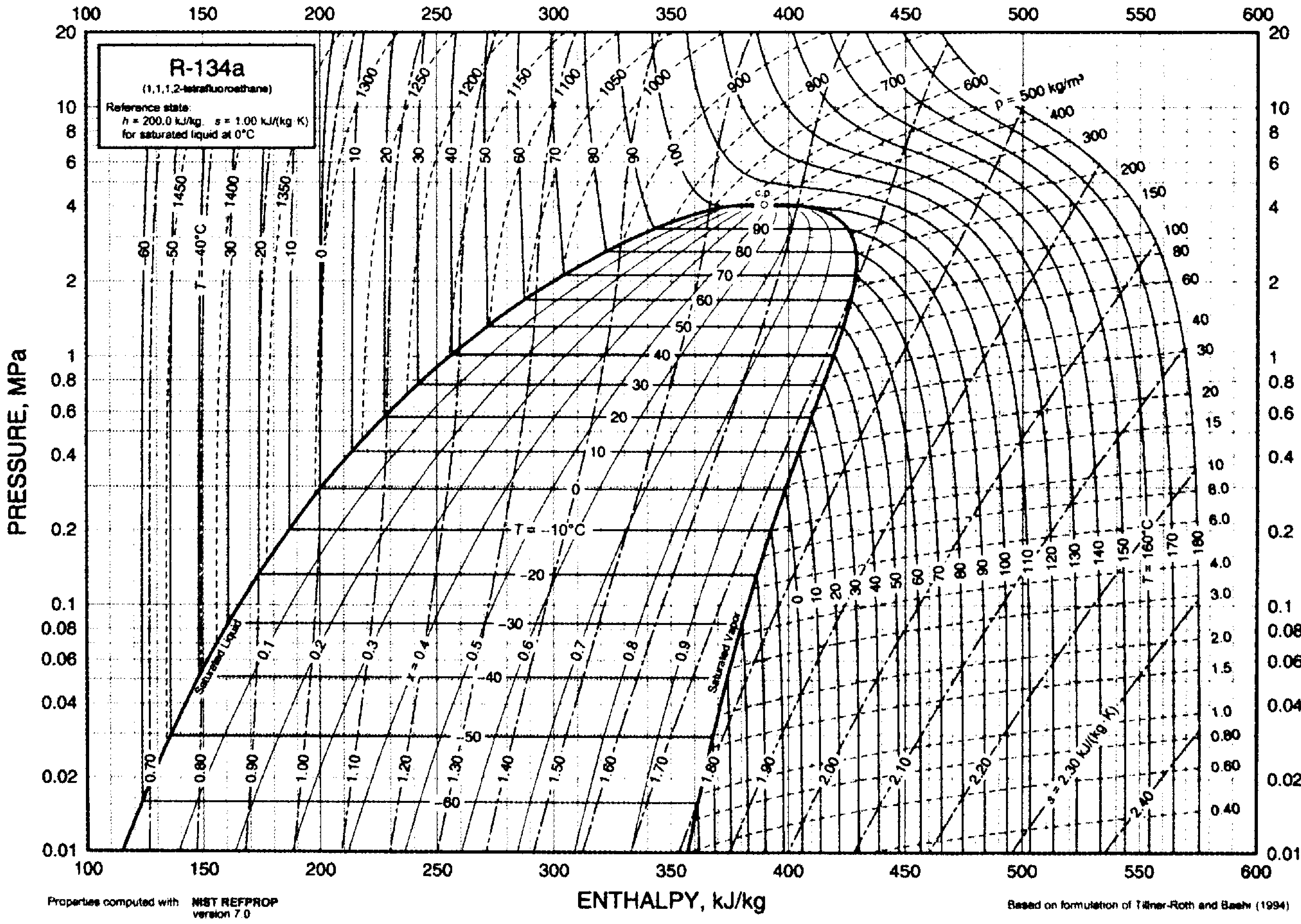
ضغط ٣,٠ ميغاباسكال (تشبع ٨٦,٢٠°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م٣	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	876.21	334.7	1.4171
sat.V	189.35	427.34	1.6748
90	173.860	435.78	1.6982
100	150.580	453.10	1.7453
110	136.480	467.77	1.7841
120	126.320	481.32	1.8190
130	118.380	494.26	1.8515
140	111.900	506.86	1.8824
150	106.430	519.24	1.9120
160	101.700	531.50	1.9406
170	97.5610	543.68	1.9684
180	93.8760	555.84	1.9956
190	90.5630	568.01	2.0221
200	87.5580	580.20	2.0482
210	84.8130	592.44	2.0738
220	82.2880	604.73	2.0990
230	79.9540	617.10	2.1238
240	77.7850	629.54	2.1483

ضغط ٣,٥ ميغاباسكال (تشبع ٩٣,٧٣°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م٣	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	791.62	351.87	1.4627
sat.V	252.02	422.23	1.6545
100	206.830	439.98	1.7025
110	176.860	458.47	1.7514
120	159.320	473.85	1.7910
130	146.900	487.94	1.8264
140	137.330	501.35	1.8593
150	129.560	514.34	1.8903
160	123.050	527.08	1.9201
170	117.460	539.66	1.9488
180	112.570	552.15	1.9767
190	108.240	564.59	2.0039
200	104.360	577.02	2.0304
210	100.850	589.47	2.0564
220	97.6530	601.96	2.0820
230	94.7160	614.49	2.1072
240	92.0040	627.08	2.1320
250	89.4900	639.74	2.1564

ضغط ٤,٠ ميغاباسكال (تشبع ١٠٠,٣٤°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م٣	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	632.87	375.57	1.5247
sat.V	390.23	405.38	1.6046
110	234.040	446.26	1.7131
120	200.280	465.10	1.7616
130	180.220	480.90	1.8013
140	165.990	495.38	1.8368
150	155.030	509.12	1.8697
160	146.160	522.43	1.9008
170	138.730	535.47	1.9305
180	132.370	548.33	1.9592
190	126.820	561.08	1.9871
200	121.910	573.78	2.0142
210	117.510	586.46	2.0407
220	113.540	599.14	2.0667
230	109.920	611.85	2.0922
240	106.600	624.60	2.1173
250	103.540	637.40	2.1420
260	100.710	650.27	2.1664

ضغط ٤,٥ ميغاباسكال			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م٣	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
110	341.900	426.22	1.6561
120	254.710	454.33	1.7286
130	220.250	472.91	1.7753
140	198.770	488.86	1.8144
150	183.300	503.56	1.8495
160	171.300	517.55	1.8822
170	161.540	531.11	1.9132
180	153.370	544.38	1.9428
190	146.350	557.48	1.9714
200	140.230	570.46	1.9991
210	134.810	583.39	2.0261
220	129.960	596.28	2.0525
230	125.570	609.17	2.0784
240	121.580	622.09	2.1038
250	117.920	635.04	2.1288
260	114.540	648.05	2.1535

ضغط ٥,٠ ميغاباسكال			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م٣	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
110	607.830	391.02	1.5613
120	335.330	440.09	1.6880
130	270.040	463.66	1.7472
140	236.820	481.69	1.7914
150	214.900	497.61	1.8295
160	198.740	512.42	1.8641
170	186.040	526.58	1.8964
180	175.650	540.32	1.9271
190	166.900	553.79	1.9565
200	159.360	567.09	1.9849
210	152.760	580.27	2.0125
220	146.920	593.39	2.0393
230	141.680	606.48	2.0656
240	136.930	619.57	2.0914
250	132.610	632.67	2.1167
260	128.650	645.81	2.1416



شكل أ-٢ خريطة الضغط-الانثالبي لمبرد R-134a [ASHRAE 2009]

جدول أ-٥ الخواص الثيرموديناميكية لمبرد R-717 لسائل و بخار مشبع [SHRAE 2009]

درجة الحرارة °م	الضغط ميغاباسكال	الكثافة كجم/م³	الحجم النوعي م³/كجم	الانثالبي كجول/كجم		الانتروبي كجول/كجم.كلفن		الحرارة النوعية كجول/كجم.كلفن		c_p/c_v	سرعة الصوت م/ث		اللزوجة ميكروباسكال.ث		الموصلية الحرارية ملي وات/(م.كلفن)		التوتر السطحي ملي نيوتن/م	درجة الحرارة °م
		سائل	بخار	سائل	بخار	سائل	بخار	سائل	بخار	بخار	سائل	بخار	سائل	بخار	سائل	بخار		
-77.65[a]	0.00609	732.9	15.602	-143.15	1341.23	-0.4716	7.1213	4.202	2.063	1.325	2124	354.1	559.6	6.84	819.9	19.64	62.26	-77.65
-70	0.01094	724.7	9.0079	-110.81	1355.55	-0.3094	6.9088	4.245	2.086	1.327	2051	360.5	475.0	7.03	792.1	19.73	59.10	-70
-60	**0.02189**	**713.6**	**4.7057**	**-68.06**	**1373.73**	**-0.1040**	**6.6602**	**4.303**	**2.125**	**1.330**	**1967**	**368.4**	**391.3**	**7.30**	**757.0**	**19.93**	**55.05**	**-60**
-50	0.04084	702.1	2.6277	-24.73	1391.19	0.0945	6.4396	4.360	2.178	1.335	1890	375.6	328.9	7.57	722.3	20.24	51.11	-50
-40	0.07169	690.2	1.5533	19.17	1407.76	0.2867	6.2425	4.414	2.244	1.342	1816	382.2	281.2	7.86	688.1	20.64	47.26	-40
-38	**0.07971**	**687.7**	**1.4068**	**28.01**	**1410.96**	**0.3245**	**6.2056**	**4.424**	**2.259**	**1.343**	**1802**	**383.4**	**273.1**	**7.92**	**681.4**	**20.73**	**46.51**	**-38**
-36	0.08845	685.3	1.2765	36.88	1414.11	0.3619	6.1694	4.434	2.275	1.345	1787	384.6	265.3	7.98	674.6	20.83	45.75	-36
-34	0.09795	682.8	1.1604	45.77	1417.23	0.3992	6.1339	4.444	2.291	1.347	1773	385.8	257.9	8.03	667.9	20.93	45.00	-34
-33.33[b]	**0.10133**	**682.0**	**1.1242**	**48.76**	**1418.26**	**0.4117**	**6.1221**	**4.448**	**2.297**	**1.348**	**1768**	**386.2**	**255.5**	**8.05**	**665.7**	**20.97**	**44.75**	**-33.33**
-32	0.10826	680.3	1.0567	54.67	1420.29	0.4362	6.0992	4.455	2.308	1.349	1759	387.0	250.8	8.09	661.3	21.04	44.26	-32
-30	0.11943	677.8	0.96396	63.60	1423.31	0.4730	6.0651	4.465	2.326	1.351	1744	388.1	244.1	8.15	654.6	21.15	43.52	-30
-28	**0.13151**	**675.3**	**0.88082**	**72.55**	**1426.28**	**0.5096**	**6.0317**	**4.474**	**2.344**	**1.353**	**1730**	**389.2**	**237.6**	**8.21**	**648.0**	**21.26**	**42.78**	**-28**
-26	0.14457	672.8	0.80614	81.52	1429.21	0.5460	5.9989	4.484	2.363	1.355	1716	390.2	231.4	8.27	641.5	21.38	42.05	-26
-24	0.15864	670.3	0.73896	90.51	1432.08	0.5821	5.9667	4.494	2.383	1.358	1702	391.2	225.5	8.33	634.9	21.51	41.32	-24
-22	**0.17379**	**667.7**	**0.67840**	**99.52**	**1434.91**	**0.6180**	**5.9351**	**4.504**	**2.403**	**1.360**	**1687**	**392.2**	**219.8**	**8.39**	**628.4**	**21.63**	**40.60**	**-22**
-20	0.19008	665.1	0.62373	108.55	1437.68	0.6538	5.9041	4.514	2.425	1.363	1673	393.2	214.4	8.45	622.0	21.77	39.88	-20
-18	0.20756	662.6	0.57428	117.60	1440.39	0.6893	5.8736	4.524	2.446	1.365	1659	394.1	209.2	8.51	615.5	21.90	39.16	-18
-16	**0.22630**	**660.0**	**0.52949**	**126.67**	**1443.06**	**0.7246**	**5.8437**	**4.534**	**2.469**	**1.368**	**1645**	**395.0**	**204.2**	**8.57**	**609.1**	**22.05**	**38.45**	**-16**
-14	0.24637	657.3	0.48885	135.76	1445.66	0.7597	5.8143	4.543	2.493	1.371	1631	395.8	199.3	8.63	602.8	22.19	37.74	-14
-12	0.26782	654.7	0.45192	144.88	1448.21	0.7946	5.7853	4.553	2.517	1.375	1616	396.7	194.7	8.69	596.4	22.35	37.04	-12
-10	**0.29071**	**652.1**	**0.41830**	**154.01**	**1450.70**	**0.8293**	**5.7569**	**4.564**	**2.542**	**1.378**	**1602**	**397.5**	**190.2**	**8.75**	**590.1**	**22.50**	**36.34**	**-10**
-8	0.31513	649.4	0.38767	163.16	1453.14	0.8638	5.7289	4.574	2.568	1.382	1588	398.2	185.9	8.81	583.9	22.67	35.65	-8
-6	0.34114	646.7	0.35970	172.34	1455.51	0.8981	5.7013	4.584	2.594	1.385	1574	398.9	181.7	8.87	577.7	22.83	34.96	-6
-4	**0.36880**	**644.0**	**0.33414**	**181.54**	**1457.81**	**0.9323**	**5.6741**	**4.595**	**2.622**	**1.389**	**1559**	**399.6**	**177.7**	**8.93**	**571.5**	**23.00**	**34.27**	**-4**
-2	0.39819	641.3	0.31074	190.76	1460.06	0.9662	5.6474	4.606	2.651	1.393	1545	400.2	173.8	8.99	565.3	23.18	33.59	-2
0	0.42938	638.6	0.28930	200.00	1462.24	1.0000	5.6210	4.617	2.680	1.398	1531	400.8	170.1	9.06	559.2	23.37	32.91	0
2	**0.46246**	**635.8**	**0.26962**	**209.27**	**1464.35**	**1.0336**	**5.5951**	**4.628**	**2.710**	**1.402**	**1516**	**401.4**	**166.5**	**9.12**	**553.1**	**23.55**	**32.24**	**2**
4	0.49748	633.1	0.25153	218.55	1466.40	1.0670	5.5695	4.639	2.742	1.407	1502	401.9	162.9	9.18	547.1	23.75	31.57	4
6	0.53453	630.3	0.23489	227.87	1468.37	1.1003	5.5442	4.651	2.774	1.412	1487	402.4	159.5	9.24	541.1	23.95	30.91	6
8	**0.57370**	**627.5**	**0.21956**	**237.20**	**1470.28**	**1.1334**	**5.5192**	**4.663**	**2.807**	**1.417**	**1473**	**402.8**	**156.2**	**9.30**	**535.1**	**24.15**	**30.24**	**8**
10	0.61505	624.6	0.20543	246.57	1472.11	1.1664	5.4946	4.676	2.841	1.422	1458	403.2	153.0	9.36	529.1	24.37	29.59	10
12	0.65866	621.8	0.19237	255.95	1473.88	1.1992	5.4703	4.689	2.877	1.428	1443	403.6	149.9	9.43	523.2	24.58	28.94	12
14	**0.70463**	**618.9**	**0.18031**	**265.37**	**1475.56**	**1.2318**	**5.4463**	**4.702**	**2.913**	**1.434**	**1429**	**403.9**	**146.9**	**9.49**	**517.3**	**24.81**	**28.29**	**14**
16	0.75303	616.0	0.16914	274.81	1477.17	1.2643	5.4226	4.716	2.951	1.440	1414	404.2	144.0	9.55	511.5	25.04	27.65	16
18	0.80395	613.1	0.15879	284.28	1478.70	1.2967	5.3991	4.730	2.990	1.446	1399	404.4	141.1	9.61	505.6	25.27	27.01	18
20	**0.85748**	**610.2**	**0.14920**	**293.78**	**1480.16**	**1.3289**	**5.3759**	**4.745**	**3.030**	**1.453**	**1384**	**404.6**	**138.3**	**9.68**	**499.9**	**25.52**	**26.38**	**20**
22	0.91369	607.2	0.14029	303.31	1481.53	1.3610	5.3529	4.760	3.071	1.460	1370	404.8	135.6	9.74	494.1	25.77	25.75	22
24	0.97268	604.3	0.13201	312.87	1482.82	1.3929	5.3301	4.776	3.113	1.468	1355	404.9	133.0	9.80	488.4	26.03	25.12	24
26	**1.03450**	**601.3**	**0.12431**	**322.47**	**1484.02**	**1.4248**	**5.3076**	**4.793**	**3.158**	**1.475**	**1340**	**404.9**	**130.4**	**9.87**	**482.7**	**26.29**	**24.50**	**26**
28	1.09930	598.2	0.11714	332.09	1485.14	1.4565	5.2853	4.810	3.203	1.484	1324	405.0	127.9	9.93	477.0	26.57	23.89	28
30	1.16720	595.2	0.11046	341.76	1486.17	1.4881	5.2631	4.828	3.250	1.492	1309	404.9	125.5	10.00	471.4	26.85	23.28	30
32	**1.23820**	**592.1**	**0.10422**	**351.45**	**1487.11**	**1.5196**	**5.2412**	**4.847**	**3.299**	**1.501**	**1294**	**404.8**	**123.1**	**10.06**	**465.7**	**27.14**	**22.67**	**32**
34	1.31240	589.0	0.09840	361.19	1487.95	1.5509	5.2194	4.867	3.349	1.510	1279	404.7	120.7	10.13	460.1	27.43	22.07	34
36	1.39000	585.8	0.09296	370.96	1488.70	1.5822	5.1978	4.888	3.401	1.520	1263	404.5	118.4	10.19	454.6	27.74	21.47	36
38	**1.47090**	**582.6**	**0.08787**	**380.78**	**1489.36**	**1.6134**	**5.1763**	**4.909**	**3.455**	**1.530**	**1248**	**404.3**	**116.2**	**10.26**	**449.1**	**28.05**	**20.88**	**38**
40	1.55540	579.4	0.08310	390.64	1489.91	1.6446	5.1549	4.932	3.510	1.541	1232	404.0	114.0	10.33	443.5	28.38	20.29	40
42	1.64350	576.2	0.07863	400.54	1490.36	1.6756	5.1337	4.956	3.568	1.553	1216	403.7	111.9	10.39	438.0	28.71	19.71	42
44	**1.73530**	**572.9**	**0.07445**	**410.48**	**1490.70**	**1.7065**	**5.1126**	**4.981**	**3.628**	**1.565**	**1201**	**403.3**	**109.8**	**10.46**	**432.6**	**29.06**	**19.13**	**44**
46	1.83100	569.6	0.07052	420.48	1490.94	1.7374	5.0915	5.007	3.691	1.577	1185	402.9	107.8	10.53	427.1	29.41	18.56	46
48	1.93050	566.3	0.06682	430.52	1491.06	1.7683	5.0706	5.034	3.756	1.591	1169	402.4	105.8	10.60	421.7	29.78	17.99	48
50	**2.03400**	**562.9**	**0.06335**	**440.62**	**1491.07**	**1.7990**	**5.0497**	**5.064**	**3.823**	**1.605**	**1153**	**401.9**	**103.8**	**10.67**	**416.3**	**30.16**	**17.43**	**50**
55	2.31110	554.2	0.05554	466.10	1490.57	1.8758	4.9977	5.143	4.005	1.643	1112	400.3	99.0	10.86	402.9	31.16	16.04	55
60	2.61560	545.2	0.04880	491.97	1489.27	1.9523	4.9458	5.235	4.208	1.687	1070	398.3	94.5	11.05	389.6	32.26	14.69	60
65	**2.94910**	**536.0**	**0.04296**	**518.26**	**1487.09**	**2.0288**	**4.8939**	**5.341**	**4.438**	**1.739**	**1028**	**396.0**	**90.1**	**11.25**	**376.4**	**33.47**	**13.37**	**65**
70	3.31350	526.3	0.03787	545.04	1483.94	2.1054	4.8415	5.465	4.699	1.799	984	393.3	85.9	11.47	363.2	34.80	12.08	70
75	3.71050	516.2	0.03342	572.37	1479.72	2.1823	4.7885	5.610	5.001	1.870	940	390.1	81.9	11.70	350.2	36.30	10.83	75
80	**4.14200**	**505.7**	**0.02951**	**600.34**	**1474.31**	**2.2596**	**4.7344**	**5.784**	**5.355**	**1.955**	**895**	**386.5**	**78.0**	**11.95**	**337.1**	**38.00**	**9.61**	**80**
85	4.61000	494.5	0.02606	629.04	1467.53	2.3377	4.6789	5.993	5.777	2.058	848	382.5	74.2	12.23	324.1	39.95	8.44	85
90	5.11670	482.8	0.02300	658.61	1459.19	2.4168	4.6213	6.250	6.291	2.187	800	377.9	70.5	12.55	311.0	42.24	7.30	90
95	**5.66430**	**470.2**	**0.02027**	**689.19**	**1449.01**	**2.4973**	**4.5612**	**6.573**	**6.933**	**2.349**	**751**	**372.7**	**66.8**	**12.91**	**297.9**	**44.99**	**6.20**	**95**
100	6.25530	456.6	0.01782	721.00	1436.63	2.5797	4.4975	6.991	7.762	2.562	701	367.0	63.2	13.32	284.8	48.36	5.15	100
105	6.89230	441.9	0.01561	754.35	1421.57	2.6647	4.4291	7.555	8.877	2.851	649	360.5	59.6	13.82	271.5	52.65	4.15	105
110	**7.57830**	**425.6**	**0.01360**	**789.68**	**1403.08**	**2.7533**	**4.3542**	**8.360**	**10.46**	**3.26**	**594**	**353.3**	**56.0**	**14.42**	**258.1**	**58.33**	**3.20**	**110**
115	8.31700	407.2	0.01174	827.74	1379.99	2.8474	4.2702	9.630	12.91	3.91	538	345.0	52.3	15.19	244.6	66.28	2.31	115
120	9.11250	385.5	0.00999	869.92	1350.23	2.9502	4.1719	11.940	17.21	5.04	477	335.4	48.3	16.21	231.2	78.40	1.50	120
125	**9.97002**	**357.8**	**0.00828**	**919.68**	**1309.12**	**3.0702**	**4.0483**	**17.660**	**27.00**	**7.62**	**411**	**323.6**	**43.8**	**17.73**	**219.1**	**100.01**	**0.77**	**125**
130	10.89770	312.3	0.00638	992.02	1239.32	3.2437	3.8571	54.210	76.49	20.66	334	306.6	37.3	20.63	221.9	160.39	0.18	130
132.25[c]	11.33300	225.0	0.00444	1119.22	1119.22	3.5542	3.5542	∞	∞	∞	0	0.0			∞	∞	0.00	132.25

[a] النقطة الثلاثية

[b] درجة حرارة الغليان الطبيعية

[c] النقطة الحرجة

جدول أ-٦ خواص المبرد ٧١٧ (R717) للبخار المحمص [NIST-Refprop8]

ضغط ٠,٠٥ ميغاباسكال (تشبع -٤٦,٥٢°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	697.97	-9.501	0.16215
sat.V	0.45978	1397.1	6.3685
-40	0.4459	1411.3	6.4305
-30	0.4265	1432.9	6.5211
-20	0.4088	1454.3	6.6072
-10	0.3926	1475.5	6.6895
0	0.3777	1496.7	6.7686
10	0.3640	1517.9	6.8447
20	0.3513	1539.1	6.9183
30	0.3395	1560.4	6.9897
40	0.3284	1581.7	7.059
50	0.3181	1603.2	7.1265
60	0.3085	1624.8	7.1923
70	0.2994	1646.5	7.2566
80	0.2908	1668.4	7.3194
90	0.2827	1690.4	7.3809
100	0.2751	1712.6	7.4411
110	0.2678	1734.9	7.5002

ضغط ٠,١٠ ميغاباسكال (تشبع -٣٣,٥٩°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	682.29	47.599	0.40684
sat.V	0.87867	1417.9	6.1267
-30	0.8641	1426.1	6.1607
-20	0.8263	1448.5	6.2513
-10	0.7923	1470.6	6.3369
0	0.7612	1492.5	6.4184
10	0.7328	1514.2	6.4965
20	0.7066	1535.9	6.5717
30	0.6823	1557.5	6.6443
40	0.6597	1579.2	6.7146
50	0.6387	1600.9	6.7829
60	0.6190	1622.7	6.8493
70	0.6005	1644.6	6.9141
80	0.5832	1666.6	6.9774
90	0.5668	1688.8	7.0392
100	0.5514	1711.1	7.0998
110	0.5367	1733.6	7.1592
120	0.5229	1756.2	7.2175

ضغط ٠,١٥ ميغاباسكال (تشبع -٢٥,٢١°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	671.8	85.069	0.56027
sat.V	1.2841	1430.3	5.9861
-20	1.2535	1442.6	6.035
-10	1.1995	1465.6	6.1242
0	1.1508	1488.2	6.2085
10	1.1066	1510.5	6.2886
20	1.0660	1532.6	6.3654
30	1.0286	1554.6	6.4392
40	0.9940	1576.6	6.5105
50	0.9617	1598.8	6.5796
60	0.9317	1620.6	6.6467
70	0.9036	1642.7	6.712
80	0.8771	1664.9	6.7758
90	0.8523	1687.2	6.838
100	0.8289	1709.6	6.899
110	0.8067	1732.2	6.9587
120	0.7858	1754.9	7.0172
130	0.7659	1777.8	7.0747

ضغط ٠,٢٠ ميغاباسكال (تشبع -١٨,٨٥°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	663.65	113.76	0.67424
sat.V	1.6817	1439.2	5.8865
-10	1.6148	1460.5	5.9685
0	1.5468	1483.8	6.0557
10	1.4855	1506.7	6.138
20	1.4297	1529.3	6.2164
30	1.3784	1551.7	6.2915
40	1.3312	1574	6.3638
50	1.2873	1596.2	6.4338
60	1.2466	1618.5	6.5016
70	1.2085	1640.8	6.5675
80	1.1728	1663.1	6.6317
90	1.1392	1685.6	6.6943
100	1.1076	1708.1	6.7556
110	1.0778	1730.8	6.8156
120	1.0496	1753.6	6.8744
130	1.0230	1776.6	6.9321
140	0.9976	1799.7	6.9888

ضغط ٠,٢٥ ميغاباسكال (تشبع -١٣,٦٥°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	656.88	137.35	0.76576
sat.V	2.074	1446.1	5.8092
-10	2.0386	1455.2	5.8438
0	1.9496	1479.3	5.934
10	1.8699	1502.9	6.0186
20	1.7978	1526	6.0987
30	1.7319	1548.8	6.1752
40	1.6715	1571.4	6.2486
50	1.6156	1593.9	6.3194
60	1.5637	1616.4	6.3879
70	1.5153	1638.8	6.4544
80	1.4700	1661.4	6.5191
90	1.4276	1683.9	6.5821
100	1.3877	1706.6	6.6437
110	1.3500	1729.4	6.704
120	1.3145	1752.3	6.7631
130	1.2808	1775.4	6.821
140	1.2489	1798.6	6.8778

ضغط ٠,٣٠ ميغاباسكال (تشبع -٩,٢٢°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	651.03	157.56	0.84269
sat.V	2.4625	1451.7	5.7459
0	2.3595	1474.7	5.8319
10	2.2599	1498.9	5.9189
20	2.1705	1522.5	6.0009
30	2.0892	1545.8	6.0787
40	2.0149	1568.7	6.1533
50	1.9464	1591.5	6.2249
60	1.8830	1614.2	6.2941
70	1.8240	1636.9	6.3612
80	1.7690	1659.6	6.4264
90	1.7174	1682.3	6.4898
100	1.6690	1705.1	6.5518
110	1.6234	1728	6.6124
120	1.5803	1751	6.6717
130	1.5396	1774.2	6.7298
140	1.5011	1797.5	6.7868
150	1.4644	1820.9	6.8429

ضغط ٠,٤ ميغاباسكال (تشبع -١,٨٨°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	641.14	191.31	0.96824
sat.V	3.232	1460.2	5.6458
0	3.2026	1465.2	5.664
10	3.0582	1490.8	5.7563
20	2.9304	1515.6	5.8422
30	2.8157	1539.7	5.923
40	2.7116	1563.3	5.9999
50	2.6164	1586.7	6.0733
60	2.5287	1609.9	6.144
70	2.4476	1633	6.2123
80	2.3721	1656	6.2784
90	2.3016	1679	6.3428
100	2.2355	1702.1	6.4054
110	2.1735	1725.2	6.4666
120	2.1150	1748.4	6.5264
130	2.0598	1771.8	6.585
140	2.0076	1795.2	6.6424
150	1.9582	1818.8	6.6988

ضغط ٠,٥ ميغاباسكال (تشبع ٤,١٤°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	632.86	219.2	1.0694
sat.V	3.9948	1466.5	5.5677
10	3.8828	1482.3	5.6241
20	3.7111	1508.3	5.7143
30	3.5589	1533.4	5.7983
40	3.4221	1557.8	5.8776
50	3.2978	1581.8	5.953
60	3.1841	1605.5	6.0252
70	3.0793	1629	6.0948
80	2.9822	1652.4	6.1619
90	2.8918	1675.7	6.2271
100	2.8074	1699.1	6.2905
110	2.7282	1722.4	6.3523
120	2.6538	1745.8	6.4126
130	2.5837	1769.3	6.4716
140	2.5174	1792.9	6.5295
150	2.4547	1816.7	6.5862
160	2.3952	1840.5	6.642

ضغط ٠,٦ ميغاباسكال (تشبع ٩,٢٨°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	625.65	243.21	1.1546
sat.V	4.7539	1471.5	5.5034
10	4.7367	1473.5	5.5105
20	4.5144	1500.8	5.6055
30	4.3200	1526.9	5.693
40	4.1471	1552.2	5.7749
50	3.9913	1576.8	5.8524
60	3.8495	1601	5.9262
70	3.7195	1625	5.997
80	3.5996	1648.7	6.0653
90	3.4883	1672.4	6.1313
100	3.3846	1696	6.1954
110	3.2877	1719.6	6.2578
120	3.1967	1743.2	6.3187
130	3.1112	1766.9	6.3782
140	3.0305	1790.7	6.4364
150	2.9542	1814.5	6.4935
160	2.8819	1838.5	6.5496

جدول أ-٦ خواص المبرد ٧١٧ (R717) للبخار المحمص [NIST-Refprop8] (مستمر)

ضغط ٠,٧ ميغاباسكال (تشبع ١٣,٨٠°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	619.21	264.44	1.2286
sat.V	5.5111	1475.4	5.4487
20	5.3424	1493.1	5.5095
30	5.1004	1520.3	5.6009
40	4.8875	1546.4	5.6856
50	4.6974	1571.7	5.7652
60	4.5254	1596.5	5.8407
70	4.3686	1620.9	5.9129
80	4.2245	1645	5.9823
90	4.0912	1669	6.0492
100	3.9675	1692.9	6.1141
110	3.8520	1716.7	6.1771
120	3.7439	1740.6	6.2385
130	3.6424	1764.4	6.2985
140	3.5468	1788.4	6.3571
150	3.4565	1812.4	6.4146
160	3.3711	1836.5	6.4709
170	3.2902	1860.8	6.5263

ضغط ٠,٨ ميغاباسكال (تشبع ١٧,٨٥°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	613.35	283.56	1.2942
sat.V	6.2676	1478.6	5.4009
20	6.1976	1485	5.4227
30	5.9016	1513.4	5.5182
40	5.6444	1540.5	5.606
50	5.4167	1566.5	5.6879
60	5.2123	1591.9	5.7651
70	5.0268	1616.8	5.8387
80	4.8571	1641.3	5.9092
90	4.7008	1665.6	5.9771
100	4.5560	1689.8	6.0427
110	4.4213	1713.9	6.1064
120	4.2954	1737.9	6.1684
130	4.1774	1762	6.2288
140	4.0665	1786.1	6.2879
150	3.9619	1810.2	6.3457
160	3.8630	1834.5	6.4023
170	3.7694	1858.9	6.458

ضغط ٠,٩ ميغاباسكال (تشبع ٢١,٥٢°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	607.95	301.03	1.3533
sat.V	7.0244	1481.2	5.3584
30	6.7254	1506.4	5.4425
40	6.4189	1534.4	5.5335
50	6.1501	1561.2	5.6179
60	5.9106	1587.2	5.697
70	5.6946	1612.6	5.7721
80	5.4978	1637.5	5.8437
90	5.3172	1662.2	5.9126
100	5.1504	1686.6	5.979
110	4.9957	1711	6.0433
120	4.8514	1735.2	6.1059
130	4.7163	1759.5	6.1668
140	4.5896	1783.8	6.2263
150	4.4702	1808.1	6.2844
160	4.3576	1832.5	6.3414
170	4.2510	1857	6.3973
180	4.1500	1881.6	6.4522

ضغط ١,٠ ميغاباسكال (تشبع ٢٤,٩٠°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	602.92	317.16	1.4072
sat.V	7.7823	1483.4	5.32
40	7.2121	1528.2	5.4667
50	6.8984	1555.8	5.5536
60	6.621	1582.4	5.6348
70	6.3722	1608.3	5.7113
80	6.1467	1633.7	5.7842
90	5.9406	1658.7	5.854
100	5.7509	1683.4	5.9213
110	5.5752	1708	5.9863
120	5.4118	1732.5	6.0494
130	5.2592	1757	6.1108
140	5.1161	1781.4	6.1707
150	4.9817	1805.9	6.2292
160	4.8549	1830.4	6.2865
170	4.7351	1855	6.3427
180	4.6216	1879.8	6.3979
190	4.5139	1904.6	6.4521

ضغط ١,٢ ميغاباسكال (تشبع ٣٠,٩٤°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	593.73	346.29	1.5028
sat.V	9.3034	1486.6	5.2528
40	8.8605	1515.2	5.3453
50	8.4429	1544.6	5.438
60	8.0801	1572.6	5.5234
70	7.7589	1599.6	5.6032
80	7.4707	1625.9	5.6786
90	7.2094	1651.6	5.7505
100	6.9704	1677	5.8195
110	6.7503	1702.1	5.8859
120	6.5465	1727.1	5.9502
130	6.3570	1751.9	6.0126
140	6.1799	1776.7	6.0734
150	6.0138	1801.5	6.1327
160	5.8577	1826.3	6.1906
170	5.7105	1851.2	6.2474
180	5.5713	1876.1	6.303
190	5.4395	1901.2	6.3577

ضغط ١,٤ ميغاباسكال (تشبع ٣٦,٢٥°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	585.42	372.2	1.5862
sat.V	10.835	1488.8	5.195
40	10.6030	1501.3	5.2353
50	10.0590	1532.9	5.3346
60	9.5950	1562.5	5.4247
70	9.1905	1590.7	5.5081
80	8.8316	1617.9	5.5863
90	8.5089	1644.4	5.6604
100	8.2159	1670.5	5.7312
110	7.9477	1696.1	5.7991
120	7.7004	1721.6	5.8646
130	7.4714	1746.8	5.9281
140	7.2581	1772	5.9897
150	7.0588	1797.1	6.0498
160	6.8718	1822.2	6.1084
170	6.6959	1847.3	6.1657
180	6.5299	1872.5	6.2219
190	6.3730	1897.7	6.277

ضغط ١,٦ ميغاباسكال (تشبع ٤١,٠٢°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	577.79	395.69	1.6604
sat.V	12.379	1490.2	5.144
50	11.756	1520.5	5.2394
60	11.172	1551.9	5.335
70	10.671	1581.4	5.4223
80	10.232	1609.7	5.5036
90	9.8413	1637.1	5.58
100	9.4890	1663.8	5.6526
110	9.1684	1690.1	5.7221
120	8.8744	1716	5.7889
130	8.6031	1741.7	5.8534
140	8.3514	1767.2	5.916
150	8.1169	1792.7	5.9768
160	7.8975	1818	6.0361
170	7.6915	1843.4	6.0941
180	7.4976	1868.8	6.1507
190	7.3146	1894.3	6.2063
200	7.1414	1919.8	6.2608

ضغط ١,٨ ميغاباسكال (تشبع ٤٥,٣٦°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	570.67	417.28	1.7276
sat.V	13.939	1490.9	5.0982
50	13.5470	1507.5	5.1499
60	12.8190	1540.8	5.2516
70	12.2060	1571.8	5.3434
80	11.6760	1601.3	5.4279
90	11.2090	1629.5	5.5068
100	10.7910	1657	5.5815
110	10.4140	1683.9	5.6525
120	10.0690	1710.3	5.7207
130	9.7527	1736.5	5.7863
140	9.4602	1762.4	5.8499
150	9.1885	1788.2	5.9115
160	8.9350	1813.8	5.9715
170	8.6976	1839.5	6.03
180	8.4746	1865.1	6.0873
190	8.2645	1890.8	6.1433
200	8.0660	1916.5	6.1983

ضغط ٢,٠ ميغاباسكال (تشبع ٤٩,٣٥°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م³	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	563.97	437.34	1.789
satV	15.515	1491.1	5.0565
50	15.4490	1493.5	5.0641
60	14.5450	1529.2	5.1729
70	13.8000	1561.9	5.2695
80	13.1660	1592.6	5.3576
90	12.6140	1621.8	5.4393
100	12.1240	1650.1	5.516
110	11.6850	1677.6	5.5888
120	11.2860	1704.6	5.6584
130	10.9210	1731.2	5.7252
140	10.5850	1757.5	5.7897
150	10.2740	1783.6	5.8521
160	9.9848	1809.6	5.9129
170	9.7145	1835.5	5.972
180	9.4611	1861.4	6.0298
190	9.2228	1887.3	6.0863
200	8.9980	1913.2	6.1417

جدول أ-٦ خواص المبرد ٧١٧ (R717) للبخار المحمص [NIST-Refprop8] (أنتهى)

ضغط ٢,٢ ميغاباسكال (تشبع ٥٣,٠٥°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م^3	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	557.61	456.13	1.8459
sat.V	17.111	1490.9	5.0179
60	16.361	1517	5.0973
70	15.461	1551.6	5.1995
80	14.707	1583.6	5.2915
90	14.059	1613.9	5.3762
100	13.490	1643	5.4552
110	12.983	1671.2	5.5298
120	12.525	1698.7	5.6008
130	12.109	1725.8	5.6688
140	11.727	1752.6	5.7343
150	11.374	1779	5.7976
160	11.047	1805.4	5.8591
170	10.742	1831.6	5.9189
180	10.457	1857.7	5.9772
190	10.190	1883.8	6.0342
200	9.9377	1909.9	6.09
210	9.6998	1936.1	6.1447

ضغط ٢,٤ ميغاباسكال (تشبع ٥٦,٥١°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م^3	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	551.53	473.86	1.8989
sat.V	18.726	1490.3	4.9821
60	18.2820	1504.1	5.0239
70	17.1960	1540.8	5.1324
80	16.3050	1574.3	5.2287
90	15.5480	1605.8	5.3166
100	14.8910	1635.8	5.398
110	14.3100	1664.7	5.4745
120	13.7880	1692.8	5.547
130	13.3160	1720.4	5.6163
140	12.8850	1747.6	5.6828
150	12.4890	1774.4	5.747
160	12.1220	1801	5.8092
170	11.7820	1827.5	5.8697
180	11.4630	1853.9	5.9286
190	11.1650	1880.3	5.9861
200	10.8850	1906.6	6.0423
210	10.6210	1933	6.0975

ضغط ٢,٦ ميغاباسكال (تشبع ٥٩,٧٦°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م^3	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	545.69	490.69	1.9486
sat.V	20.364	1489.4	4.9484
60	20.3280	1490.4	4.9515
70	19.0150	1529.5	5.0673
80	17.9630	1564.8	5.1685
90	17.0840	1597.4	5.2598
100	16.3290	1628.4	5.3438
110	15.6670	1658	5.4223
120	15.0770	1686.8	5.4964
130	14.5450	1714.9	5.567
140	14.0620	1742.5	5.6346
150	13.6190	1769.7	5.6998
160	13.2110	1796.7	5.7627
170	12.8320	1823.5	5.8239
180	12.4800	1850.1	5.8833
190	12.1500	1876.7	5.9413
200	11.8400	1903.3	5.998
210	11.5490	1929.8	6.0536

ضغط ٢,٨ ميغاباسكال (تشبع ٦٢,٨٢°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م^3	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	540.05	506.74	1.9954
sat.V	22.025	1488.1	4.9166
70	20.930	1517.7	5.0035
80	19.690	1554.8	5.1102
90	18.672	1588.8	5.2053
100	17.807	1620.8	5.2921
110	17.056	1651.3	5.3727
120	16.392	1680.7	5.4485
130	15.796	1709.3	5.5205
140	15.257	1737.4	5.5892
150	14.765	1765	5.6553
160	14.313	1792.3	5.7191
170	13.895	1819.4	5.7809
180	13.506	1846.3	5.8409
190	13.144	1873.1	5.8995
200	12.804	1899.9	5.9566
210	12.485	1926.6	6.0125
220	12.184	1953.4	6.0673

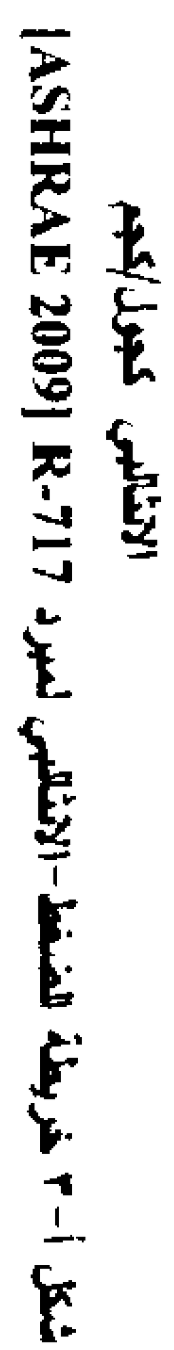
ضغط ٣,٠ ميغاباسكال (تشبع ٦٥,٧٣°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م^3	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	534.59	522.11	2.0399
sat.V	23.711	1486.7	4.8863
70	22.9570	1505.2	4.9405
80	21.4930	1544.5	5.0534
90	20.3150	1580	5.1526
100	19.3290	1613	5.2424
110	18.4790	1644.4	5.3253
120	17.7340	1674.5	5.4029
130	17.0700	1703.7	5.4763
140	16.4720	1732.2	5.5462
150	15.9280	1760.3	5.6132
160	15.4290	1787.9	5.6778
170	14.9700	1815.3	5.7403
180	14.5430	1842.5	5.801
190	14.1470	1869.5	5.86
200	13.7760	1896.5	5.9176
210	13.4270	1923.4	5.974
220	13.1000	1950.4	6.0291

ضغط ٣,٥ ميغاباسكال (تشبع ٧٢,٤٠°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م^3	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	521.52	558.1	2.1423
sat.V	28.045	1482.1	4.8161
80	26.4030	1516.5	4.9146
90	24.7060	1556.5	5.0265
100	23.3420	1592.8	5.125
110	22.2020	1626.5	5.2142
120	21.2210	1658.5	5.2967
130	20.3620	1689.2	5.3739
140	19.5980	1719	5.4469
150	18.9090	1748.1	5.5165
160	18.2840	1776.7	5.5832
170	17.7120	1804.9	5.6476
180	17.1850	1832.8	5.7098
190	16.6960	1860.4	5.7702
200	16.2410	1888	5.829
210	15.8170	1915.4	5.8864
220	15.4180	1942.8	5.9424
230	15.0430	1970.1	5.9973

ضغط ٤,٠ ميغاباسكال (تشبع ٧٨,٤٠°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م^3	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	509.11	591.32	2.2348
sat.V	32.566	1476.2	4.7518
80	32.083	1484.4	4.7752
90	29.596	1530.7	4.9044
100	27.711	1570.9	5.0139
110	26.192	1607.6	5.1107
120	24.918	1641.7	5.1988
130	23.822	1674.2	5.2803
140	22.861	1705.4	5.3567
150	22.006	1735.7	5.4291
160	21.237	1765.2	5.4982
170	20.538	1794.2	5.5644
180	19.898	1822.9	5.6283
190	19.308	1851.2	5.6902
200	18.762	1879.3	5.7502
210	18.254	1907.3	5.8086
220	17.779	1935.1	5.8657
230	17.334	1962.9	5.9214

ضغط ٤,٥ ميغاباسكال (تشبع ٨٣,٨٦°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م^3	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	497.13	622.43	2.3198
sat.V	37.302	1469.2	4.6917
90	35.1680	1501.6	4.7818
100	32.5290	1547.2	4.9057
110	30.5030	1587.4	5.0119
120	28.8580	1624.1	5.1086
130	27.4730	1658.5	5.193
140	26.2790	1691.3	5.2733
150	25.2300	1722.8	5.3487
160	24.2950	1753.5	5.4202
170	23.4530	1783.4	5.4885
180	22.6870	1812.8	5.5542
190	21.9860	1841.8	5.6176
200	21.3400	1870.5	5.6788
210	20.7410	1899	5.7384
220	20.1840	1927.3	5.7965
230	19.6630	1955.6	5.8531
240	19.1750	1983.7	5.9085

ضغط ٥,٠ ميغاباسكال (تشبع ٨٨,٨٨°م)			
د.الحرارة °م	الكثافة كجم/م^3	انثالبي كجول/كجم	انتروبي كجول/كجم°م
sat.L	485.45	651.92	2.399
sat.V	42.282	1461.2	4.6344
90	41.7450	1468	4.6531
100	37.9340	1521.1	4.7974
110	35.2080	1565.7	4.9156
120	33.0830	1605.5	5.0181
130	31.3410	1642.2	5.1102
140	29.8680	1676.7	5.1947
150	28.5910	1709.6	5.2735
160	27.4670	1741.4	5.3477
170	26.4630	1772.3	5.4182
180	25.5580	1802.5	5.4857
190	24.7330	1832.3	5.5506
200	23.9780	1861.6	5.6133
210	23.2810	1890.7	5.6741
220	22.6350	1919.5	5.7331
230	22.0330	1948.2	5.7907
240	21.4710	1976.7	5.8469



شكل أ-٣ خريطة الضغط-الإنثالبي لمبرد R-717 [ASHRAE 2009]

ملحق ب: خواص الهواء الرطب

جدول ب-١ خواص الهواء الرطب عند ضغط جوي ١٠١,٣٢٥ كيلوباسكال [ASHRAE 2009]

درجة الحرارة °م	نسبة الرطوبة كجم ماء/كجم هواء	الحجم النوعي م³/كجم هواء			الانثالبي كجول/كجم هواء			الانتروبي كجول/كجم هواء.كلفن		درجة الحرارة °م
t	W_s	v_{da}	v_{as}	v_s	h_{da}	h_{as}	h_s	s_{da}	s_s	t
-60	0.0000067	0.6027	0.0000	0.6027	-60.341	0.016	-60.325	-0.2494	-0.2494	-60
-59	0.0000076	0.6055	0.0000	0.6055	-59.335	0.018	-59.317	-0.2447	-0.2446	-59
-58	0.0000087	0.6084	0.0000	0.6084	-58.329	0.021	-58.308	-0.2400	-0.2399	-58
-57	0.0000100	0.6112	0.0000	0.6112	-57.323	0.024	-57.299	-0.2354	-0.2353	-57
-56	0.0000114	0.6141	0.0000	0.6141	-56.317	0.027	-56.289	-0.2307	-0.2306	-56
-55	0.0000129	0.6169	0.0000	0.6169	-55.311	0.031	-55.280	-0.2261	-0.2260	-55
-54	0.0000147	0.6198	0.0000	0.6198	-54.305	0.035	-54.269	-0.2215	-0.2213	-54
-53	0.0000167	0.6226	0.0000	0.6226	-53.299	0.040	-53.258	-0.2169	-0.2167	-53
-52	0.0000190	0.6255	0.0000	0.6255	-52.293	0.046	-52.247	-0.2124	-0.2121	-52
-51	0.0000215	0.6283	0.0000	0.6283	-51.287	0.052	-51.235	-0.2078	-0.2076	51
-50	0.0000243	0.6312	0.0000	0.6312	-50.281	0.059	-50.222	-0.2033	-0.2030	50
-49	0.0000275	0.6340	0.0000	0.6340	-49.275	0.066	-49.209	-0.1988	-0.1985	-49
-48	0.0000311	0.6369	0.0000	0.6369	-48.269	0.075	-48.194	-0.1943	-0.1940	-48
-47	0.0000350	0.6397	0.0000	0.6397	-47.263	0.085	-47.179	-0.1899	-0.1895	-47
-46	0.0000395	0.6425	0.0000	0.6426	-46.257	0.095	-46.162	-0.1854	-0.1850	-46
-45	0.0000445	0.6454	0.0000	0.6454	-45.252	0.107	-45.144	-0.1810	-0.1805	-45
-44	0.0000500	0.6482	0.0001	0.6483	-44.246	0.121	-44.125	-0.1766	-0.1761	-44
-43	0.0000562	0.6511	0.0001	0.6511	-43.240	0.136	-43.104	0.1722	0.1716	-43
-42	0.0000631	0.6539	0.0001	0.6540	-42.234	0.153	-42.081	-0.1679	-0.1672	-42
-41	0.0000708	0.6568	0.0001	0.6568	-41.229	0.172	-41.057	-0.1635	-0.1628	-41
-40	0.0000793	0.6596	0.0001	0.6597	-40.223	0.192	-40.031	0.1592	0.1583	40
-39	0.0000887	0.6625	0.0001	0.6626	-39.217	0.215	-39.002	-0.1549	-0.1539	-39
-38	0.0000992	0.6653	0.0001	0.6654	-38.212	0.241	-37.970	-0.1506	-0.1495	38
-37	0.0001108	0.6682	0.0001	0.6683	-37.206	0.269	-36.936	-0.1464	-0.1451	-37
-36	0.0001237	0.6710	0.0001	0.6711	-36.200	0.301	-35.899	0.1421	-0.1408	-36
-35	0.0001379	0.6738	0.0001	0.6740	-35.195	0.336	-34.859	-0.1379	-0.1364	-35
-34	0.0001536	0.6767	0.0002	0.6769	-34.189	0.374	33.815	-0.1337	0.1320	34
-33	0.0001710	0.6795	0.0002	0.6797	-33.183	0.417	-32.766	-0.1295	-0.1276	33
-32	0.0001902	0.6824	0.0002	0.6826	-32.178	0.464	-31.714	-0.1253	0.1232	32
-31	0.0002113	0.6852	0.0002	0.6855	-31.172	0.516	-30.656	0.1211	0.1189	-31
-30	0.0002345	0.6881	0.0003	0.6883	-30.167	0.573	-29.593	-0.1170	0.1145	-30
-29	0.0002602	0.6909	0.0003	0.6912	-29.161	0.636	-28.525	0.1129	-0.1101	29
-28	0.0002883	0.6938	0.0003	0.6941	-28.156	0.706	-27.450	0.1088	0.1057	-28
-27	0.0003193	0.6966	0.0004	0.6970	-27.150	0.782	-26.368	-0.1047	0.1013	27
-26	0.0003532	0.6994	0.0004	0.6998	-26.144	0.866	25.278	0.1006	-0.0969	26
-25	0.0003905	0.7023	0.0004	0.7027	-25.139	0.958	-24.181	0.0965	0.0924	25
-24	0.0004314	0.7051	0.0005	0.7056	-24.133	1.059	-23.074	0.0925	-0.0880	24
-23	0.0004761	0.7080	0.0005	0.7085	-23.128	1.170	-21.958	-0.0884	0.0835	23
-22	0.0005251	0.7108	0.0006	0.7114	-22.122	1.291	20.831	-0.0844	-0.0790	-22
-21	0.0005787	0.7137	0.0007	0.7143	-21.117	1.424	-19.693	0.0804	-0.0745	21
-20	0.0006373	0.7165	0.0007	0.7172	20.111	1.570	-18.542	0.0765	0.0699	20
-19	0.0007013	0.7193	0.0008	0.7201	-19.106	1.728	17.377	0.0725	0.0653	-19
-18	0.0007711	0.7222	0.0009	0.7231	-18.100	1.902	-16.198	0.0685	0.0607	18
-17	0.0008473	0.7250	0.0010	0.7260	-17.095	2.091	15.003	0.0646	0.0560	17
-16	0.0009303	0.7279	0.0011	0.7290	-16.089	2.298	-13.791	-0.0607	-0.0513	16
-15	0.0010207	0.7307	0.0012	0.7319	-15.084	2.523	-12.560	0.0568	0.0465	15
-14	0.0011191	0.7336	0.0013	0.7349	14.078	2.769	11.310	0.0529	-0.0416	14
13	0.0012261	0.7364	0.0014	0.7378	13.073	3.036	-10.037	0.0490	0.0367	13
-12	0.0013425	0.7392	0.0016	0.7408	-12.067	3.326	-8.741	0.0452	0.0317	12
-11	0.0014689	0.7421	0.0017	0.7438	-11.062	3.642	7.419	0.0413	0.0267	11
10	0.0016062	0.7449	0.0019	0.7468	-10.056	3.986	-6.070	-0.0375	0.0215	10
-9	0.0017551	0.7478	0.0021	0.7499	-9.050	4.358	4.692	-0.0337	0.0163	9
-8	0.0019166	0.7506	0.0023	0.7529	-8.045	4.763	-3.282	-0.0299	0.0110	8
-7	0.0020916	0.7534	0.0025	0.7560	-7.039	5.202	1.838	-0.0261	0.0055	7
-6	0.0022812	0.7563	0.0028	0.7591	-6.034	5.677	0.356	0.0223	0.0000	6
-5	0.0024863	0.7591	0.0030	0.7622	-5.028	6.193	1.164	0.0186	0.0057	5
-4	0.0027083	0.7620	0.0033	0.7653	4.023	6.750	2.728	0.0148	0.0115	4
-3	0.0029482	0.7648	0.0036	0.7684	3.017	7.354	4.337	0.0111	0.0175	3
-2	0.0032076	0.7677	0.0039	0.7716	2.011	8.007	5.995	0.0074	0.0236	2
1	0.0034877	0.7705	0.0043	0.7748	-1.006	8.712	7.707	-0.0037	0.0299	1
0	0.0037900	0.7733	0.0047	0.7780	0.000	9.475	9.475	0.0000	0.0364	0
1	0.004076	0.7762	0.0051	0.7813	1.006	10.198	11.203	0.0037	0.0427	1
2	0.004382	0.7790	0.0055	0.7845	2.011	10.970	12.981	0.0073	0.0492	2
3	0.004708	0.7819	0.0059	0.7878	3.017	11.794	14.811	0.0110	0.0559	3
4	0.005055	0.7847	0.0064	0.7911	4.023	12.673	16.696	0.0146	0.0627	4
5	0.005425	0.7875	0.0068	0.7944	5.029	13.611	18.639	0.0182	0.0697	5
6	0.005819	0.7904	0.0074	0.7978	6.034	14.610	20.644	0.0219	0.0769	6
7	0.006238	0.7932	0.0079	0.8012	7.040	15.674	22.714	0.0254	0.0843	7
8	0.006684	0.7961	0.0085	0.8046	8.046	16.807	24.853	0.0290	0.0919	8
9	0.007158	0.7989	0.0092	0.8081	9.052	18.013	27.065	0.0326	0.0997	9
10	0.007663	0.8017	0.0098	0.8116	10.058	19.297	29.354	0.0362	0.1078	10
11	0.008199	0.8046	0.0106	0.8152	11.063	20.661	31.724	0.0397	0.1162	11
12	0.008768	0.8074	0.0113	0.8188	12.069	22.111	34.181	0.0432	0.1248	12
13	0.009372	0.8103	0.0122	0.8224	13.075	23.653	36.728	0.0468	0.1337	13
14	0.010013	0.8131	0.0131	0.8262	14.081	25.290	39.371	0.0503	0.1430	14

جدول ب-١ خواص الهواء الرطب عند ضغط جوي ١٠١,٣٢٥ كيلوباسكال [ASHRAE 2009]

درجة الحرارة °م	نسبة الرطوبة كجم ماء/كجم هواء	الحجم النوعي م³/كجم هواء			الانثالبي كجول/كجم هواء			الانتروبي، كجول/كجم هواء.كلفن		درجة الحرارة °م
t	W_s	v_{da}	v_{as}	v_s	h_{da}	h_{as}	h_s	s_{da}	s_s	t
15	0.010694	0.8159	0.0140	0.8299	15.087	27.028	42.115	0.0538	0.1525	15
16	0.011415	0.8188	0.0150	0.8338	16.093	28.873	44.966	0.0573	0.1624	16
17	0.012181	0.8216	0.0160	0.8377	17.099	30.830	47.929	0.0607	0.1726	17
18	0.012991	0.8245	0.0172	0.8416	18.105	32.906	51.011	0.0642	0.1832	18
19	0.013851	0.8273	0.0184	0.8457	19.111	35.107	54.219	0.0676	0.1942	19
20	0.014761	0.8301	0.0196	0.8498	20.117	37.441	57.558	0.0711	0.2057	20
21	0.015724	0.8330	0.0210	0.8540	21.124	39.914	61.037	0.0745	0.2175	21
22	0.016744	0.8358	0.0224	0.8583	22.130	42.533	64.663	0.0779	0.2298	22
23	0.017823	0.8387	0.0240	0.8626	23.136	45.308	68.444	0.0813	0.2426	23
24	0.018965	0.8415	0.0256	0.8671	24.142	48.245	72.388	0.0847	0.2560	24
25	0.020173	0.8443	0.0273	0.8716	25.148	51.355	76.503	0.0881	0.2698	25
26	0.021451	0.8472	0.0291	0.8763	26.155	54.646	80.801	0.0915	0.2842	26
27	0.022802	0.8500	0.0311	0.8811	27.161	58.128	85.289	0.0948	0.2992	27
28	0.024229	0.8529	0.0331	0.8860	28.167	61.812	89.979	0.0982	0.3148	28
29	0.025738	0.8557	0.0353	0.8910	29.174	65.708	94.882	0.1015	0.3311	29
30	0.027333	0.8585	0.0376	0.8961	30.180	69.829	100.009	0.1048	0.3481	30
31	0.029018	0.8614	0.0400	0.9014	31.187	74.185	105.372	0.1081	0.3658	31
32	0.030797	0.8642	0.0426	0.9069	32.193	78.791	110.985	0.1115	0.3843	32
33	0.032677	0.8671	0.0454	0.9124	33.200	83.660	116.860	0.1147	0.4035	33
34	0.034663	0.8699	0.0483	0.9182	34.207	88.806	123.013	0.1180	0.4236	34
35	0.036760	0.8727	0.0514	0.9241	35.213	94.245	129.458	0.1213	0.4447	35
36	0.038975	0.8756	0.0547	0.9302	36.220	99.993	136.213	0.1246	0.4666	36
37	0.041313	0.8784	0.0581	0.9365	37.227	106.068	143.294	0.1278	0.4895	37
38	0.043783	0.8813	0.0618	0.9430	38.233	112.487	150.720	0.1311	0.5135	38
39	0.046391	0.8841	0.0657	0.9498	39.240	119.270	158.510	0.1343	0.5386	39
40	0.049145	0.8869	0.0698	0.9567	40.247	126.438	166.685	0.1375	0.5649	40
41	0.052053	0.8898	0.0741	0.9639	41.254	134.014	175.268	0.1407	0.5923	41
42	0.055124	0.8926	0.0788	0.9714	42.261	142.021	184.282	0.1439	0.6211	42
43	0.058368	0.8955	0.0837	0.9791	43.268	150.483	193.751	0.1471	0.6512	43
44	0.061795	0.8983	0.0888	0.9871	44.275	159.429	203.704	0.1503	0.6828	44
45	0.065416	0.9011	0.0943	0.9955	45.282	168.887	214.169	0.1535	0.7159	45
46	0.069242	0.9040	0.1002	1.0041	46.289	178.889	225.178	0.1566	0.7507	46
47	0.073286	0.9068	0.1063	1.0131	47.297	189.466	236.763	0.1598	0.7871	47
48	0.077561	0.9096	0.1129	1.0225	48.304	200.656	248.960	0.1629	0.8254	48
49	0.082081	0.9125	0.1198	1.0323	49.311	212.497	261.808	0.1660	0.8655	49
50	0.086863	0.9153	0.1272	1.0425	50.319	225.030	275.349	0.1692	0.9078	50
51	0.091922	0.9182	0.1350	1.0531	51.326	238.300	289.627	0.1723	0.9522	51
52	0.097278	0.9210	0.1433	1.0643	52.334	252.357	304.690	0.1754	0.9989	52
53	0.102949	0.9238	0.1521	1.0759	53.341	267.251	320.592	0.1785	1.0481	53
54	0.108958	0.9267	0.1614	1.0881	54.349	283.041	337.389	0.1816	1.0999	54
55	0.115326	0.9295	0.1714	1.1009	55.356	299.788	355.144	0.1846	1.1545	55
56	0.122080	0.9324	0.1819	1.1143	56.364	317.560	373.924	0.1877	1.2121	56
57	0.129248	0.9352	0.1932	1.1284	57.372	336.431	393.803	0.1908	1.2729	57
58	0.136858	0.9380	0.2051	1.1432	58.380	356.482	414.862	0.1938	1.3371	58
59	0.144945	0.9409	0.2179	1.1587	59.388	377.800	437.188	0.1968	1.4050	59
60	0.153545	0.9437	0.2315	1.1752	60.396	400.484	460.880	0.1999	1.4769	60
61	0.162697	0.9465	0.2460	1.1925	61.404	424.641	486.044	0.2029	1.5530	61
62	0.172446	0.9494	0.2615	1.2108	62.412	450.388	512.799	0.2059	1.6337	62
63	0.182842	0.9522	0.2780	1.2302	63.420	477.856	541.276	0.2089	1.7194	63
64	0.193937	0.9551	0.2957	1.2508	64.428	507.192	571.620	0.2119	1.8105	64
65	0.205794	0.9579	0.3147	1.2726	65.436	538.557	603.993	0.2149	1.9074	65
66	0.218478	0.9607	0.3350	1.2957	66.445	572.131	638.576	0.2179	2.0107	66
67	0.232067	0.9636	0.3568	1.3204	67.453	608.118	675.572	0.2208	2.1209	67
68	0.246645	0.9664	0.3803	1.3467	68.462	646.746	715.208	0.2238	2.2386	68
69	0.262309	0.9692	0.4056	1.3748	69.470	688.271	757.741	0.2268	2.3646	69
70	0.279167	0.9721	0.4328	1.4049	70.479	732.985	803.464	0.2297	2.4997	70
71	0.297343	0.9749	0.4622	1.4372	71.488	781.220	852.707	0.2326	2.6449	71
72	0.316979	0.9778	0.4941	1.4719	72.496	833.353	905.850	0.2356	2.8011	72
73	0.338237	0.9806	0.5287	1.5093	73.505	889.821	963.326	0.2385	2.9697	73
74	0.361304	0.9834	0.5663	1.5497	74.514	951.124	1025.638	0.2414	3.1520	74
75	0.386399	0.9863	0.6072	1.5935	75.523	1017.843	1093.367	0.2443	3.3496	75
76	0.413774	0.9891	0.6520	1.6411	76.532	1090.659	1167.191	0.2472	3.5645	76
77	0.443727	0.9919	0.7010	1.6930	77.542	1170.366	1247.907	0.2501	3.7989	77
78	0.476610	0.9948	0.7550	1.7497	78.551	1257.907	1336.458	0.2529	4.0553	78
79	0.512842	0.9976	0.8145	1.8121	79.560	1354.402	1433.962	0.2558	4.3371	79
80	0.552926	1.0005	0.8805	1.8809	80.569	1461.196	1541.765	0.2587	4.6478	80
81	0.597470	1.0033	0.9539	1.9572	81.579	1579.917	1661.496	0.2615	4.9920	81
82	0.647218	1.0061	1.0360	2.0421	82.589	1712.556	1795.145	0.2644	5.3754	82
83	0.703089	1.0090	1.1283	2.1373	83.598	1861.573	1945.171	0.2672	5.8047	83
84	0.766233	1.0118	1.2328	2.2446	84.608	2030.041	2114.649	0.2701	6.2885	84
85	0.838105	1.0146	1.3519	2.3665	85.618	2221.858	2307.476	0.2729	6.8376	85
86	0.920580	1.0175	1.4887	2.5062	86.628	2442.035	2528.662	0.2757	7.4660	86
87	1.016105	1.0203	1.6473	2.6676	87.638	2697.127	2784.764	0.2785	8.1919	87
88	1.127952	1.0232	1.8332	2.8564	88.648	2995.880	3084.528	0.2813	9.0396	88
89	1.260579	1.0260	2.0539	3.0799	89.658	3350.228	3439.885	0.2841	10.0421	89
90	1.420235	1.0288	2.3198	3.3487	90.668	3776.888	3867.556	0.2869	11.2458	90



شكل ب– ١ خريطة خواص الهواء الرطب عند ضغط جوي ١ [ASHRAE 2005].

جدول ج-١ الخواص الثيرموديناميكية للماء عند التشبع [ASHRAE 2009]

درجة الحرارة °م t	ضغط التشبع كيلوباسكال p_{ws}	الحجم النوعي م³/كجم صلب/سائل v_i/v_f	الفرق v_{ig}/v_{fg}	بخار v_g	الانثالبي، كجول/كجم صلب/سائل h_i/h_f	الفرق h_{ig}/h_{fg}	بخار h_g	الانتروبي، كجول/كجم.كلفن صلب/سائل s_i/s_f	الفرق s_{ig}/s_{fg}	بخار s_g	درجة الحرارة °م t
-60	0.00108	0.001081	90971.58	90971.58	-446.12	2836.27	2390.14	-1.6842	13.3064	11.6222	-60
-59	0.00124	0.001082	79885.31	79885.31	-444.46	2836.45	2391.99	-1.6764	13.2452	11.5687	-59
-58	0.00141	0.001082	70235.77	70235.78	-442.79	2836.63	2393.85	-1.6687	13.1845	11.5158	-58
-57	0.00161	0.001082	61826.23	61826.24	-441.11	2836.81	2395.70	-1.6609	13.1243	11.4634	-57
-56	0.00184	0.001082	54488.28	54488.28	-439.42	2836.97	2397.55	-1.6531	13.0646	11.4115	-56
-55	0.00209	0.001082	48077.54	48077.54	-437.73	2837.13	2399.40	-1.6453	13.0054	11.3601	-55
-54	0.00238	0.001082	42470.11	42470.11	-436.03	2837.28	2401.25	-1.6375	12.9468	11.3092	-54
-53	0.00271	0.001082	37559.49	37559.50	-434.32	2837.42	2403.10	-1.6298	12.8886	11.2589	-53
-52	0.00307	0.001083	33254.07	33254.07	-432.61	2837.56	2404.95	-1.6220	12.8310	11.2090	-52
-51	0.00348	0.001083	29474.87	29474.87	-430.88	2837.69	2406.81	-1.6142	12.7738	11.1596	-51
-50	0.00394	0.001083	26153.80	26153.80	-429.16	2837.81	2408.66	-1.6065	12.7171	11.1106	-50
-49	0.00445	0.001083	23232.03	23232.04	-427.42	2837.93	2410.51	-1.5987	12.6609	11.0622	-49
-48	0.00503	0.001083	20658.70	20658.70	-425.68	2838.04	2412.36	-1.5909	12.6051	11.0142	-48
-47	0.00568	0.001083	18389.75	18389.75	-423.93	2838.14	2414.21	-1.5832	12.5498	10.9666	-47
-46	0.00640	0.001083	16387.03	16387.03	-422.17	2838.23	2416.06	-1.5754	12.4950	10.9196	-46
45	0.00720	0.001084	14617.39	14617.39	-420.40	2838.32	2417.91	-1.5677	12.4406	10.8729	-45
-44	0.00810	0.001084	13052.07	13052.07	-418.63	2838.39	2419.76	-1.5599	12.3867	10.8267	-44
-43	0.00910	0.001084	11666.02	11666.02	-416.85	2838.47	2421.62	-1.5522	12.3331	10.7810	-43
-42	0.01022	0.001084	10437.46	10437.46	-415.06	2838.53	2423.47	-1.5444	12.2801	10.7356	-42
-41	0.01146	0.001084	9347.38	9347.38	-413.27	2838.59	2425.32	-1.5367	12.2274	10.6907	-41
-40	0.01284	0.001084	8379.20	8379.20	-411.47	2838.64	2427.17	-1.5289	12.1752	10.6462	-40
-39	0.01437	0.001085	7518.44	7518.44	-409.66	2838.68	2429.02	-1.5212	12.1234	10.6022	-39
38	0.01607	0.001085	6752.43	6752.43	-407.85	2838.72	2430.87	-1.5135	12.0720	10.5585	-38
37	0.01795	0.001085	6070.08	6070.08	-406.02	2838.74	2432.72	-1.5057	12.0210	10.5152	-37
-36	0.02004	0.001085	5461.68	5461.68	-404.19	2838.76	2434.57	-1.4980	11.9704	10.4724	-36
35	0.02234	0.001085	4918.69	4918.69	-402.36	2838.78	2436.42	-1.4903	11.9202	10.4299	-35
-34	0.02489	0.001085	4433.64	4433.64	-400.51	2838.78	2438.27	-1.4825	11.8703	10.3878	-34
-33	0.02771	0.001085	3999.95	3999.95	-398.66	2838.78	2440.12	-1.4748	11.8209	10.3461	-33
32	0.03081	0.001086	3611.82	3611.82	-396.80	2838.77	2441.97	-1.4671	11.7718	10.3047	-32
31	0.03423	0.001086	3264.15	3264.16	-394.94	2838.75	2443.82	-1.4594	11.7231	10.2638	-31
30	0.03801	0.001086	2952.46	2952.46	-393.06	2838.73	2445.67	-1.4516	11.6748	10.2232	-30
29	0.04215	0.001086	2672.77	2672.77	-391.18	2838.70	2447.51	-1.4439	11.6269	10.1830	-29
28	0.04672	0.001086	2421.58	2421.58	-389.29	2838.66	2449.36	-1.4362	11.5793	10.1431	-28
-27	0.05173	0.001086	2195.80	2195.80	-387.40	2838.61	2451.21	-1.4285	11.5321	10.1036	-27
26	0.05724	0.001087	1992.68	1992.68	-385.50	2838.56	2453.06	-1.4208	11.4852	10.0644	-26
-25	0.06327	0.001087	1809.79	1809.79	383.59	2838.49	2454.91	-1.4131	11.4386	10.0256	-25
-24	0.06989	0.001087	1644.99	1644.99	-381.67	2838.42	2456.75	-1.4054	11.3925	9.9871	-24
23	0.07714	0.001087	1496.36	1496.36	-379.75	2838.35	2458.60	-1.3977	11.3466	9.9489	-23
22	0.08508	0.001087	1362.21	1362.21	-377.81	2838.26	2460.45	-1.3899	11.3011	9.9111	-22
21	0.09376	0.001087	1241.03	1241.03	-375.88	2838.17	2462.29	-1.3822	11.2559	9.8736	-21
-20	0.10324	0.001087	1131.49	1131.49	-373.93	2838.07	2464.14	-1.3745	11.2110	9.8365	-20
19	0.11360	0.001088	1032.38	1032.38	371.98	2837.96	2465.98	-1.3668	11.1665	9.7996	-19
18	0.12490	0.001088	942.64	942.65	-370.01	2837.84	2467.83	-1.3591	11.1223	9.7631	-18
17	0.13722	0.001088	861.34	861.34	-368.05	2837.72	2469.67	-1.3514	11.0784	9.7269	-17
-16	0.15065	0.001088	787.61	787.61	-366.07	2837.59	2471.51	-1.3437	11.0348	9.6910	-16
-15	0.16527	0.001088	720.70	720.70	-364.09	2837.45	2473.36	-1.3360	10.9915	9.6554	-15
-14	0.18119	0.001088	659.94	659.94	-362.10	2837.30	2475.20	-1.3284	10.9485	9.6201	-14
13	0.19849	0.001089	604.72	604.73	-360.10	2837.14	2477.04	-1.3207	10.9058	9.5851	-13
-12	0.21729	0.001089	554.51	554.51	-358.10	2836.98	2478.88	-1.3130	10.8634	9.5504	-12
-11	0.23771	0.001089	508.81	508.81	-356.08	2836.80	2480.72	-1.3053	10.8213	9.5160	-11
10	0.25987	0.001089	467.19	467.19	-354.06	2836.62	2482.56	-1.2976	10.7795	9.4819	-10
-9	0.28391	0.001089	429.25	429.26	-352.04	2836.44	2484.40	-1.2899	10.7380	9.4481	-9
8	0.30995	0.001089	394.66	394.66	-350.00	2836.24	2486.23	-1.2822	10.6967	9.4145	-8
-7	0.33817	0.001090	363.09	363.09	-347.96	2836.03	2488.07	-1.2745	10.6558	9.3812	-7
-6	0.36871	0.001090	334.26	334.26	-345.91	2835.82	2489.91	-1.2668	10.6151	9.3482	-6
5	0.40174	0.001090	307.92	307.92	-343.86	2835.60	2491.74	-1.2592	10.5747	9.3155	-5
-4	0.43745	0.001090	283.82	283.83	-341.79	2835.37	2493.57	-1.2515	10.5345	9.2830	-4
3	0.47604	0.001090	261.78	261.78	339.72	2835.13	2495.41	-1.2438	10.4946	9.2508	-3
2	0.51770	0.001091	241.60	241.60	-337.64	2834.88	2497.24	-1.2361	10.4550	9.2189	-2
1	0.56266	0.001091	223.10	223.11	-335.56	2834.63	2499.07	-1.2284	10.4157	9.1872	-1
0	0.61115	0.001091	206.15	206.15	-333.47	2834.36	2500.90	-1.2208	10.3766	9.1558	0

جدول ج-١ الخواص الثيرموديناميكية للماء عند التشبع [ASHRAE 2009] تابع.

درجة الحرارة	ضغط التشبع	الحجم النوعي م³/كجم			الانثالبي، كجول/كجم			الانتروبي، كجول/كجم.كلفن			درجة الحرارة
م° t	كيلوباسكال p_{ws}	صلب/سائل v_i/v_f	الفرق v_{ig}/v_{fg}	بخار v_g	صلب/سائل h_i/h_f	الفرق h_{ig}/h_{fg}	بخار h_g	صلب/سائل s_i/s_f	الفرق s_{ig}/s_{fg}	بخار s_g	م° t
0	0.6112	0.001000	206.139	206.140	-0.04	2500.93	2500.89	-0.0002	9.1559	9.1558	0
1	0.6571	0.001000	192.444	192.445	4.18	2498.55	2502.73	0.0153	9.1138	9.1291	1
2	0.7060	0.001000	179.763	179.764	8.39	2496.17	2504.57	0.0306	9.0721	9.1027	2
3	0.7581	0.001000	168.013	168.014	12.60	2493.80	2506.40	0.0459	9.0306	9.0765	3
4	0.8135	0.001000	157.120	157.121	16.81	2491.42	2508.24	0.0611	8.9895	9.0506	4
5	0.8726	0.001000	147.016	147.017	21.02	2489.05	2510.07	0.0763	8.9486	9.0249	5
6	0.9354	0.001000	137.637	137.638	25.22	2486.68	2511.91	0.0913	8.9081	8.9994	6
7	1.0021	0.001000	128.927	128.928	29.43	2484.31	2513.74	0.1064	8.8678	8.9742	7
8	1.0730	0.001000	120.833	120.834	33.63	2481.94	2515.57	0.1213	8.8278	8.9492	8
9	1.1483	0.001000	113.308	113.309	37.82	2479.58	2517.40	0.1362	8.7882	8.9244	9
10	1.2282	0.001000	106.308	106.309	42.02	2477.21	2519.23	0.1511	8.7488	8.8998	10
11	1.3129	0.001000	99.792	99.793	46.22	2474.84	2521.06	0.1659	8.7096	8.8755	11
12	1.4028	0.001001	93.723	93.724	50.41	2472.48	2522.89	0.1806	8.6708	8.8514	12
13	1.4981	0.001001	88.069	88.070	54.60	2470.11	2524.71	0.1953	8.6322	8.8275	13
14	1.5989	0.001001	82.797	82.798	58.79	2467.75	2526.54	0.2099	8.5939	8.8038	14
15	1.7057	0.001001	77.880	77.881	62.98	2465.38	2528.36	0.2245	8.5559	8.7804	15
16	1.8188	0.001001	73.290	73.291	67.17	2463.01	2530.19	0.2390	8.5181	8.7571	16
17	1.9383	0.001001	69.005	69.006	71.36	2460.65	2532.01	0.2534	8.4806	8.7341	17
18	2.0647	0.001001	65.002	65.003	75.55	2458.28	2533.83	0.2678	8.4434	8.7112	18
19	2.1982	0.001002	61.260	61.261	79.73	2455.92	2535.65	0.2822	8.4064	8.6886	19
20	2.3392	0.001002	57.760	57.761	83.92	2453.55	2537.47	0.2965	8.3696	8.6661	20
21	2.4881	0.001002	54.486	54.487	88.10	2451.18	2539.29	0.3108	8.3331	8.6439	21
22	2.6452	0.001002	51.421	51.422	92.29	2448.81	2541.10	0.3250	8.2969	8.6218	22
23	2.8109	0.001003	48.551	48.552	96.47	2446.45	2542.92	0.3391	8.2609	8.6000	23
24	2.9856	0.001003	45.862	45.863	100.66	2444.08	2544.73	0.3532	8.2251	8.5783	24
25	3.1697	0.001003	43.340	43.341	104.84	2441.71	2546.54	0.3673	8.1895	8.5568	25
26	3.3637	0.001003	40.976	40.977	109.02	2439.33	2548.35	0.3813	8.1542	8.5355	26
27	3.5679	0.001004	38.757	38.758	113.20	2436.96	2550.16	0.3952	8.1192	8.5144	27
28	3.7828	0.001004	36.674	36.675	117.38	2434.59	2551.97	0.4091	8.0843	8.4934	28
29	4.0089	0.001004	34.718	34.719	121.56	2432.21	2553.78	0.4230	8.0497	8.4727	29
30	4.2467	0.001004	32.881	32.882	125.75	2429.84	2555.58	0.4368	8.0153	8.4521	30
31	4.4966	0.001005	31.153	31.154	129.93	2427.46	2557.39	0.4506	7.9812	8.4317	31
32	4.7592	0.001005	29.528	29.529	134.11	2425.08	2559.19	0.4643	7.9472	8.4115	32
33	5.0351	0.001005	28.000	28.001	138.29	2422.70	2560.99	0.4780	7.9135	8.3914	33
34	5.3247	0.001006	26.561	26.562	142.47	2420.32	2562.79	0.4916	7.8800	8.3715	34
35	5.6286	0.001006	25.207	25.208	146.64	2417.94	2564.58	0.5052	7.8467	8.3518	35
36	5.9475	0.001006	23.931	23.932	150.82	2415.56	2566.38	0.5187	7.8136	8.3323	36
37	6.2818	0.001007	22.728	22.729	155.00	2413.17	2568.17	0.5322	7.7807	8.3129	37
38	6.6324	0.001007	21.594	21.595	159.18	2410.78	2569.96	0.5457	7.7480	8.2936	38
39	6.9997	0.001007	20.525	20.526	163.36	2408.39	2571.75	0.5591	7.7155	8.2746	39
40	7.3844	0.001008	19.516	19.517	167.54	2406.00	2573.54	0.5724	7.6832	8.2557	40
41	7.7873	0.001008	18.564	18.565	171.72	2403.61	2575.33	0.5858	7.6512	8.2369	41
42	8.2090	0.001009	17.664	17.665	175.90	2401.21	2577.11	0.5990	7.6193	8.2183	42
43	8.6503	0.001009	16.815	16.816	180.08	2398.82	2578.89	0.6123	7.5876	8.1999	43
44	9.1118	0.001009	16.012	16.013	184.26	2396.42	2580.67	0.6255	7.5561	8.1816	44
45	9.5944	0.001010	15.252	15.253	188.44	2394.02	2582.45	0.6386	7.5248	8.1634	45
46	10.0988	0.001010	14.534	14.535	192.62	2391.61	2584.23	0.6517	7.4937	8.1454	46
47	10.6259	0.001011	13.855	13.856	196.80	2389.21	2586.00	0.6648	7.4628	8.1276	47
48	11.1764	0.001011	13.212	13.213	200.98	2386.80	2587.77	0.6778	7.4320	8.1099	48
49	11.7512	0.001012	12.603	12.604	205.16	2384.39	2589.54	0.6908	7.4015	8.0923	49
50	12.3513	0.001012	12.027	12.028	209.34	2381.97	2591.31	0.7038	7.3711	8.0749	50
51	12.9774	0.001013	11.481	11.482	213.52	2379.56	2593.08	0.7167	7.3409	8.0576	51
52	13.6305	0.001013	10.963	10.964	217.70	2377.14	2594.84	0.7296	7.3109	8.0405	52
53	14.3116	0.001014	10.472	10.473	221.88	2374.72	2596.60	0.7424	7.2811	8.0235	53
54	15.0215	0.001014	10.006	10.007	226.06	2372.30	2598.35	0.7552	7.2514	8.0066	54
55	15.7614	0.001015	9.5639	9.5649	230.24	2369.87	2600.11	0.7680	7.2219	7.9899	55
56	16.5322	0.001015	9.1444	9.1454	234.42	2367.44	2601.86	0.7807	7.1926	7.9733	56
57	17.3350	0.001016	8.7461	8.7471	238.61	2365.01	2603.61	0.7934	7.1634	7.9568	57
58	18.1708	0.001016	8.3678	8.3688	242.79	2362.57	2605.36	0.8060	7.1344	7.9405	58
59	19.0407	0.001017	8.0083	8.0093	246.97	2360.13	2607.10	0.8186	7.1056	7.9243	59
60	19.9458	0.001017	7.6666	7.6677	251.15	2357.69	2608.85	0.8312	7.0770	7.9082	60
61	20.8873	0.001018	7.3418	7.3428	255.34	2355.25	2610.58	0.8438	7.0485	7.8922	61
62	21.8664	0.001018	7.0328	7.0338	259.52	2352.80	2612.32	0.8563	7.0201	7.8764	62
63	22.8842	0.001019	6.7389	6.7399	263.71	2350.35	2614.05	0.8687	6.9919	7.8607	63
64	23.9421	0.001019	6.4591	6.4601	267.89	2347.89	2615.78	0.8811	6.9639	7.8451	64
65	25.0411	0.001020	6.1928	6.1938	272.08	2345.43	2617.51	0.8935	6.9361	7.8296	65
66	26.1827	0.001020	5.9392	5.9402	276.27	2342.97	2619.23	0.9059	6.9083	7.8142	66
67	27.3680	0.001021	5.6976	5.6986	280.45	2340.50	2620.96	0.9182	6.8808	7.7990	67
68	28.5986	0.001022	5.4674	5.4684	284.64	2338.03	2622.67	0.9305	6.8534	7.7839	68
69	29.8756	0.001022	5.2479	5.2490	288.83	2335.56	2624.39	0.9428	6.8261	7.7689	69

جدول ج-١ الخواص الثيرموديناميكية للماء عند التشبع [ASHRAE 2009] انتهى.

درجة الحرارة م° t	ضغط التشبع كيلوباسكال p_{ws}	الحجم النوعي م³/كجم			الإنثالبي، كجول/كجم			الإنتروبي، كجول/كجم.كلفن			درجة الحرارة م° t
		صلب/سائل v_i/v_f	الفرق v_{ig}/v_{fg}	بخار v_g	صلب/سائل h_i/h_f	الفرق h_{ig}/h_{fg}	بخار h_g	صلب/سائل s_i/s_f	الفرق s_{ig}/s_{fg}	بخار s_g	
70	31.2006	0.001023	5.0387	5.0397	293.02	2333.08	2626.10	0.9550	6.7990	7.7540	70
71	32.5750	0.001023	4.8392	4.8402	297.21	2330.60	2627.81	0.9672	6.7720	7.7392	71
72	34.0001	0.001024	4.6488	4.6498	301.40	2328.11	2629.51	0.9793	6.7452	7.7245	72
73	35.4775	0.001025	4.4671	4.4681	305.59	2325.62	2631.21	0.9915	6.7185	7.7100	73
74	37.0088	0.001025	4.2937	4.2947	309.78	2323.13	2632.91	1.0035	6.6920	7.6955	74
75	38.5954	0.001026	4.1281	4.1291	313.97	2320.63	2634.60	1.0156	6.6656	7.6812	75
76	40.2389	0.001026	3.9699	3.9709	318.17	2318.13	2636.29	1.0276	6.6393	7.6669	76
77	41.9409	0.001027	3.8188	3.8198	322.36	2315.62	2637.98	1.0396	6.6132	7.6528	77
78	43.7031	0.001028	3.6743	3.6754	326.56	2313.11	2639.66	1.0516	6.5872	7.6388	78
79	45.5271	0.001028	3.5363	3.5373	330.75	2310.59	2641.34	1.0635	6.5613	7.6248	79
80	47.4147	0.001029	3.4042	3.4053	334.95	2308.07	2643.01	1.0754	6.5356	7.6110	80
81	49.3676	0.001030	3.2780	3.2790	339.15	2305.54	2644.68	1.0873	6.5100	7.5973	81
82	51.3875	0.001030	3.1572	3.1582	343.34	2303.01	2646.35	1.0991	6.4846	7.5837	82
83	53.4762	0.001031	3.0415	3.0426	347.54	2300.47	2648.01	1.1109	6.4592	7.5701	83
84	55.6355	0.001032	2.9309	2.9319	351.74	2297.93	2649.67	1.1227	6.4340	7.5567	84
85	57.8675	0.001032	2.8249	2.8259	355.95	2295.38	2651.33	1.1344	6.4090	7.5434	85
86	60.1738	0.001033	2.7234	2.7244	360.15	2292.83	2652.98	1.1461	6.3840	7.5301	86
87	62.5565	0.001034	2.6262	2.6272	364.35	2290.27	2654.62	1.1578	6.3592	7.5170	87
88	65.0174	0.001035	2.5330	2.5341	368.56	2287.70	2656.26	1.1694	6.3345	7.5039	88
89	67.5587	0.001035	2.4437	2.4448	372.76	2285.14	2657.90	1.1811	6.3099	7.4909	89
90	70.1824	0.001036	2.3581	2.3591	376.97	2282.56	2659.53	1.1927	6.2854	7.4781	90
91	72.8904	0.001037	2.2760	2.2771	381.18	2279.98	2661.16	1.2042	6.2611	7.4653	91
92	75.6849	0.001037	2.1973	2.1983	385.38	2277.39	2662.78	1.2158	6.2368	7.4526	92
93	78.5681	0.001038	2.1217	2.1228	389.59	2274.80	2664.39	1.2273	6.2127	7.4400	93
94	81.5420	0.001039	2.0492	2.0502	393.81	2272.20	2666.01	1.2387	6.1887	7.4275	94
95	84.6089	0.001040	1.9796	1.9806	398.02	2269.60	2667.61	1.2502	6.1648	7.4150	95
96	87.7711	0.001040	1.9128	1.9138	402.23	2266.98	2669.22	1.2616	6.1411	7.4027	96
97	91.0308	0.001041	1.8486	1.8497	406.45	2264.37	2670.81	1.2730	6.1174	7.3904	97
98	94.3902	0.001042	1.7870	1.7880	410.66	2261.74	2672.40	1.2844	6.0938	7.3782	98
99	97.8518	0.001043	1.7277	1.7288	414.88	2259.11	2673.99	1.2957	6.0704	7.3661	99
100	101.4180	0.001043	1.6708	1.6719	419.10	2256.47	2675.57	1.3070	6.0471	7.3541	100
101	105.0910	0.001044	1.6161	1.6171	423.32	2253.83	2677.15	1.3183	6.0238	7.3421	101
102	108.8735	0.001045	1.5635	1.5645	427.54	2251.18	2678.72	1.3296	6.0007	7.3303	102
103	112.7678	0.001046	1.5129	1.5140	431.76	2248.52	2680.28	1.3408	5.9777	7.3185	103
104	116.7765	0.001047	1.4642	1.4653	435.99	2245.85	2681.84	1.3520	5.9548	7.3068	104
105	120.9021	0.001047	1.4174	1.4185	440.21	2243.18	2683.39	1.3632	5.9320	7.2951	105
106	125.1472	0.001048	1.3724	1.3734	444.44	2240.50	2684.94	1.3743	5.9092	7.2836	106
107	129.5145	0.001049	1.3290	1.3301	448.67	2237.81	2686.48	1.3854	5.8866	7.2721	107
108	134.0065	0.001050	1.2873	1.2883	452.90	2235.12	2688.02	1.3965	5.8641	7.2607	108
109	138.6261	0.001051	1.2471	1.2481	457.13	2232.41	2689.55	1.4076	5.8417	7.2493	109
110	143.3760	0.001052	1.2083	1.2094	461.36	2229.70	2691.07	1.4187	5.8194	7.2380	110
111	148.2588	0.001052	1.1710	1.1721	465.60	2226.99	2692.58	1.4297	5.7972	7.2268	111
112	153.2775	0.001053	1.1351	1.1362	469.83	2224.26	2694.09	1.4407	5.7750	7.2157	112
113	158.4348	0.001054	1.1005	1.1015	474.07	2221.53	2695.60	1.4517	5.7530	7.2047	113
114	163.7337	0.001055	1.0671	1.0681	478.31	2218.78	2697.09	1.4626	5.7310	7.1937	114
115	169.1770	0.001056	1.0349	1.0359	482.55	2216.03	2698.58	1.4735	5.7092	7.1827	115
116	174.7678	0.001057	1.0038	1.0049	486.80	2213.27	2700.07	1.4844	5.6874	7.1719	116
117	180.5090	0.001058	0.9739	0.9750	491.04	2210.51	2701.55	1.4953	5.6658	7.1611	117
118	186.4036	0.001059	0.9450	0.9461	495.29	2207.73	2703.02	1.5062	5.6442	7.1504	118
119	192.4547	0.001059	0.9171	0.9182	499.53	2204.94	2704.48	1.5170	5.6227	7.1397	119
120	198.6654	0.001060	0.8902	0.8913	503.78	2202.15	2705.93	1.5278	5.6013	7.1291	120
122	211.5782	0.001062	0.8392	0.8403	512.29	2196.53	2708.82	1.5494	5.5587	7.1081	122
124	225.1676	0.001064	0.7916	0.7927	520.80	2190.88	2711.69	1.5708	5.5165	7.0873	124
126	239.4597	0.001066	0.7472	0.7483	529.32	2185.19	2714.52	1.5922	5.4746	7.0668	126
128	254.4813	0.001068	0.7058	0.7068	537.85	2179.47	2717.32	1.6134	5.4330	7.0465	128
130	270.2596	0.001070	0.6670	0.6681	546.39	2173.70	2720.09	1.6346	5.3918	7.0264	130
132	286.8226	0.001072	0.6308	0.6318	554.93	2167.89	2722.83	1.6557	5.3508	7.0066	132
134	304.1989	0.001074	0.5969	0.5979	563.49	2162.04	2725.53	1.6767	5.3102	6.9869	134
136	322.4175	0.001076	0.5651	0.5662	572.05	2156.15	2728.20	1.6977	5.2698	6.9675	136
138	341.5081	0.001078	0.5353	0.5364	580.62	2150.22	2730.84	1.7185	5.2298	6.9483	138
140	361.5010	0.001080	0.5074	0.5085	589.20	2144.24	2733.44	1.7393	5.1900	6.9293	140
142	382.4271	0.001082	0.4813	0.4823	597.79	2138.22	2736.01	1.7600	5.1505	6.9105	142
144	404.3178	0.001084	0.4567	0.4577	606.39	2132.15	2738.54	1.7806	5.1112	6.8918	144
146	427.2053	0.001086	0.4336	0.4346	615.00	2126.04	2741.04	1.8011	5.0723	6.8734	146
148	451.1220	0.001088	0.4118	0.4129	623.62	2119.88	2743.50	1.8216	5.0335	6.8551	148
150	476.1014	0.001091	0.3914	0.3925	632.25	2113.67	2745.92	1.8420	4.9951	6.8370	150
152	502.1771	0.001093	0.3722	0.3733	640.89	2107.41	2748.30	1.8623	4.9569	6.8191	152
154	529.3834	0.001095	0.3541	0.3552	649.55	2101.10	2750.64	1.8825	4.9189	6.8014	154
156	557.7555	0.001097	0.3370	0.3381	658.21	2094.74	2752.95	1.9027	4.8811	6.7838	156
158	587.3287	0.001100	0.3209	0.3220	666.89	2088.32	2755.21	1.9228	4.8436	6.7664	158
160	618.1392	0.001102	0.3057	0.3068	675.57	2081.86	2757.43	1.9428	4.8063	6.7491	160

جدول د-١ الخواص الثيروفيزيائية للهواء الجاف عند الضغط الجوي.

درجة الحرارة T (K)	الكثافة ρ (kg/m^3)	الحرارة النوعية C_p (kJ/kg.K)	اللزوجة الديناميكية $\mu*10^7$ (Ns/m^2)	اللزوجة الكينماتيكية $\nu*10^6$ (m^2/s)	الموصلية الحرارية $k*10^3$ (W/m•K)	الانتشارية الحرارية $\alpha*10^6$ (m^2/s)	رقم برانتل Pr
100	3.5562	1.032	71.1	2.00	9.34	2.54	0.786
150	2.3364	1.012	103.4	4.426	13.8	5.84	0.758
200	1.7458	1.007	132.5	7.590	18.1	10.3	0.737
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	15.9	0.720
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
350	0.9950	1.009	208.2	20.92	30.0	29.9	0.700
400	0.8711	1.014	230.1	26.41	33.8	38.3	0.690
450	0.7740	1.021	250.7	32.39	37.3	47.2	0.686
500	0.6964	1.030	270.1	38.79	40.7	56.7	0.684
550	0.6329	1.040	288.4	45.57	43.9	66.7	0.683
600	0.5804	1.051	305.8	52.69	46.9	76.9	0.685
650	0.5356	1.063	322.5	60.21	49.7	87.3	0.690
700	0.4975	1.075	338.8	68.10	52.4	98.0	0.695
750	0.4643	1.087	354.6	76.37	54.9	109	0.702
800	0.4354	1.099	369.8	84.93	57.3	120	0.709
850	0.4097	1.110	384.3	93.80	59.6	131	0.716
900	0.3868	1.121	398.1	102.9	62.0	143	0.720
950	0.3666	1.131	411.3	112.2	64.3	155	0.723
1000	0.3482	1.141	424.4	121.9	66.7	168	0.726
1100	0.3166	1.159	449.0	141.8	71.5	195	0.728
1200	0.2902	1.175	473.0	162.9	76.3	224	0.728
1300	0.2679	1.189	496.0	185.1	82	238	0.719
1400	0.2488	1.207	530	213	91	303	0.703
1500	0.2322	1.230	557	240	100	350	0.685
1600	0.2177	1.248	584	268	106	390	0.688
1700	0.2049	1.267	611	298	113	435	0.685
1800	0.1935	1.286	637	329	120	482	0.683
1900	0.1833	1.307	663	362	128	534	0.677
2000	0.1741	1.337	689	396	137	589	0.672
2100	0.1658	1.372	715	431	147	646	0.667
2200	0.1582	1.417	740	468	160	714	0.655
2300	0.1513	1.478	766	506	175	783	0.647
2400	0.1448	1.558	792	547	196	869	0.630
2500	0.1389	1.665	818	589	222	960	0.613
3000	0.1135	2.726	955	841	486	1570	0.536

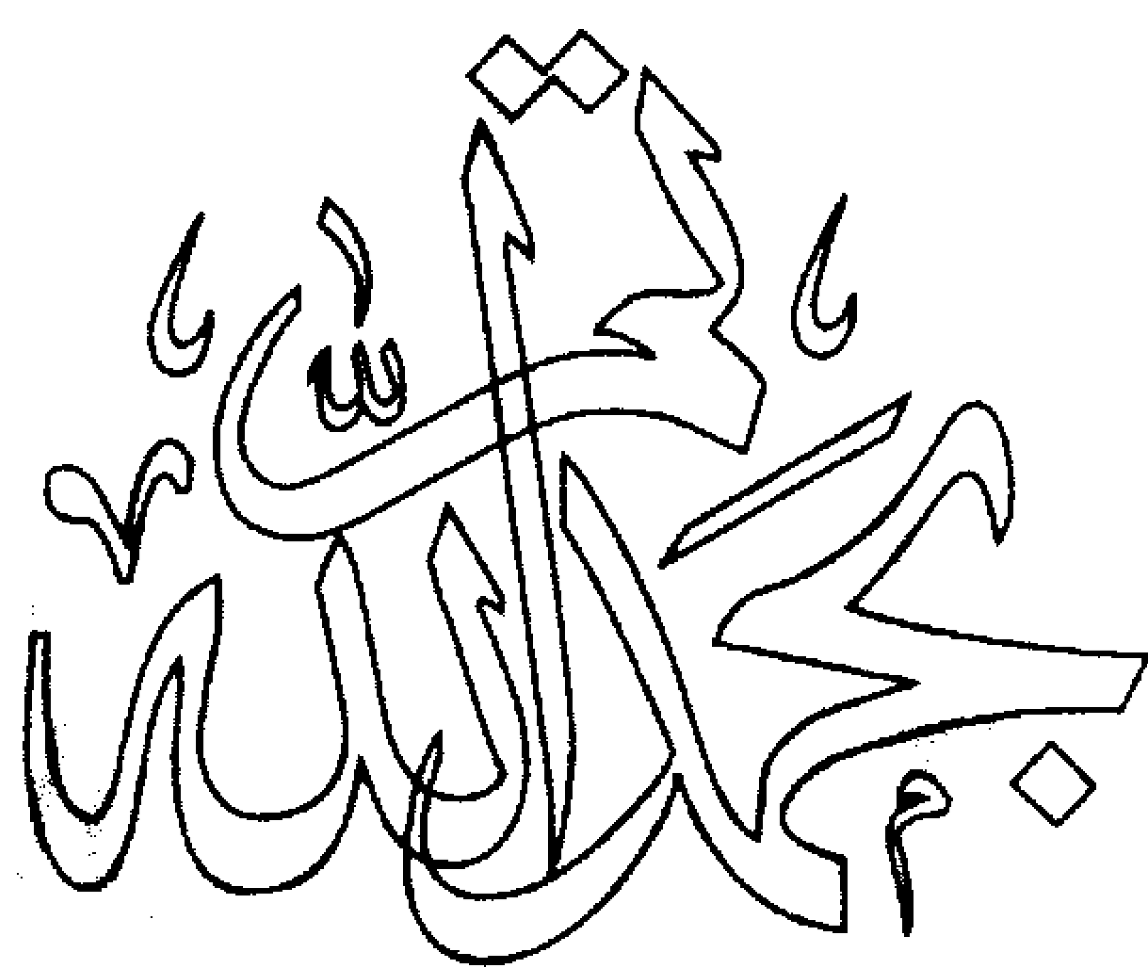
جدول د-٢ الخواص الثيرموفيزيائية للماء [Incropera 2002]

درجة الحرارة	الضغط	الحجم النوعي (m^3/kg)		حرارة التبخر (kJ/kg)	الحرارة النوعية $(kJ/kg.K)$		اللزوجة الديناميكية $(N \cdot s/m^2)$		الموصلية الحرارية k $(W/m \cdot K)$		رقم براندل Pr		التوتر السطحي (N/m)	معامل التمدد (K^{-1})	درجة الحرارة
T(K)	P (bars)	v_f*10^3	v_g	h_{fg}	$C_{p,f}$	$C_{p,g}$	μ_f*10^6	μ_g*10^6	k_f*10^3	k_g*10^3	Pr_f	Pr_g	σ_f*10^3	β_f*10^6	T(K)
273.15	0.00	1.000	206.3	2502	4.217	1.854	1750	8.02	569	18.2	12.99	0.815	75.5	-68.05	273.1
275	0.00	1.000	181.7	2497	4.211	1.855	1652	8.09	574	18.3	12.22	0.817	75.3	-32.74	275
280	0.00	1.000	130.4	2485	4.198	1.858	1422	8.29	582	18.6	10.26	0.825	74.8	46.04	280
285	0.01	1.000	99.4	2473	4.189	1.861	1225	8.49	590	18.9	8.81	0.833	74.3	114.1	285
290	0.01	1.001	69.7	2461	4.184	1.864	1080	8.69	598	19.3	7.56	0.841	73.7	174.0	290
295	0.02	1.002	51.94	2449	4.181	1.868	959	8.89	606	19.5	6.62	0.849	72.7	227.5	295
300	0.03	1.003	39.13	2438	4.179	1.872	855	9.09	613	19.6	5.83	0.857	71.7	276.1	300
305	0.04	1.005	29.74	2426	4.178	1.877	769	9.29	620	20.1	5.20	0.865	70.9	320.6	305
310	0.06	1.007	22.93	2414	4.178	1.882	695	9.49	628	20.4	4.62	0.873	70.0	361.9	310
315	0.08	1.009	17.82	2402	4.179	1.888	631	9.69	634	20.7	4.16	0.883	69.2	400.4	315
320	0.10	1.011	13.98	2390	4.180	1.895	577	9.89	640	21.0	3.77	0.894	68.3	436.7	320
325	0.13	1.013	11.06	2378	4.182	1.903	528	10.09	645	21.3	3.42	0.901	67.5	471.2	325
330	0.17	1.016	8.82	2366	4.184	1.911	489	10.29	650	21.7	3.15	0.908	66.6	504.0	330
335	0.21	1.018	7.09	2354	4.186	1.920	453	10.49	656	22.0	2.88	0.916	65.8	535.5	335
340	0.27	1.021	5.74	2342	4.188	1.930	420	10.69	660	22.3	2.66	0.925	64.9	566.0	340
345	0.33	1.024	4.68	2329	4.191	.941	389	10.89	668	22.6	2.45	0.933	64.1	595.4	345
350	0.41	1.027	3.84	2317	4.195	.954	365	11.09	668	23.0	2.29	0.942	63.2	624.2	350
355	0.51	1.030	3.18	2304	4.199	.968	343	11.29	671	23.3	2.14	0.951	62.3	652.3	355
360	0.62	1.034	2.64	2291	4.203	.983	324	11.49	674	23.7	2.02	0.960	61.4	697.9	360
365	0.75	1.038	2.21	22-78	4.209	.999	306	11.69	677	24.1	1.91	0.969	60.5	707.1	365
370	0.90	1.041	1.86	2265	4.214	2.017	289	11.89	679	24.5	1.80	0.978	59.5	728.7	370
373.15	1.01	1.044	1.67	2257	4.217	2.029	279	12.02	680	24.8	1.76	0.984	58.9	750.1	373.1
375	1.08	1.045	1.57	2252	4.220	2.036	274	12.09	681	24.9	1.70	0.987	58.6	761	375
380	1.28	1.049	1.33	2239	4.226	2.057	260	12.29	683	25.4	1.61	0.999	57.6	788	380
385	1.5	1.053	1.1	2225	4.232	2.080	248	12.49	685	25.8	1.53	1.004	56.6	814	385

جدول هـ١ معاملات التحويل للوحدات

البعد	اضرب	في	للحصول على
١-الطول			
	متر	٣,٢٨٠٨	قدم
	انش	٢,٥٤	سم
	ميل	١,٦٠٩٣	كم
	قدم	١٢	انش
٢-المساحة			
	م^{٢}	١٠,٧٦٤	قدم^{٢}
	م^{٢}	١٥٥٠	انش^{٢}
٣-الحجم			
	م^{٣}	١٠٠٠	لتر
	م^{٣}	٣٥,٣١٥	قدم^{٣}
	م^{٣}	٢٦٤,١٧	جالون أمريكي
	جالون أمريكي	٣,٧٨٥٤	لتر
٤-الكتلة			
	كجم	٢,٢٠٤٦٢	باوند_ك
	طن	١٠٠٠	كجم
	طن انجليزي (قصير)	٢٠٠٠	باوند_ك
٥-السرعة			
	م/ث	٣,٢٨٠٨	قدم/ث
	ميل/ساعة	١,٦٠٩	كم/ساعة
٦-الكثافة و الحجم النوعي			
	كجم/م^{٣}	٠,٠٦٢٤٢٨	باوند_ك/قدم^{٣}
	جم/سم^{٣}	١٠٠٠	كجم/م^{٣}
	م^{٣}/كجم	١٦,٠٢	قدم^{٣}/باوند_ك
٧-معدل السريان، معدل التدفق الحجمي			
	كيلوجرام/ث	٢,٢٠٤٦	باوند_ك/ث
	جالون/دقيقة	٠,٠٣٦١	لتر/ث
	لتر/ث	٢,١١٩	قدم^{٣}/دقيقة
٨-درجة الحرارة			
	$T(^\circ C)$	$T(^\circ C)*1.8+32$	$T(^\circ F)$
	$\Delta T(^\circ C)$	$\Delta T(^\circ C)*1.8$	ΔF
	$T(^\circ C)$	$T(^\circ C)+273.15$	$T(K)$
	$T(^\circ F)$	$T(^\circ F)+460$	$T(R)$

البعد	اضرب	في	للحصول على
٩-القوة			
	نيوتن	٠,٢٢٤٨١	باوند_ق
١٠-الضغط			
	باسكال	١,٥٤٠٤x١٠^-٤	باوند_ق/انش^٢
	بار	١٠٠	كيلوباسكال
	ضغط جوي	١٠١,٣٢٥	كيلو باسكال
	ضغط جوي	١٤,٦٩٦	باوند_ق/انش^٢
	مم زئبق	٠,١٣٣٣	كيلو باسكال
	انش زئبق	٣,٣٨٧	كيلوباسكال
	انش ماء	٠,٢٤٨٨٤	كيلوباسكال
١١-الحرارة النوعية			
	كيلوجول/(كجم.م°)	٠,٢٣٨٨٥	وحدة حرارية بريطانية/(باوند_ك.ف°)
١٢-الشغل، الحرارة، القدرة			
	كيلوجول	٠,٩٤٧٨٢	وحدة حرارية بريطانية
	وحدة حرارية بريطانية	٧٧٨,١٧	باوند_ق.قدم
	كيلوجول/كجم	٠,٤٣٠	وحدة حرارية بريطانية/باوند_ك
	وات	٣,٤١٢١٤	وحدة حرارية بريطانية/ساعة
	حصان	٥٥٠	باوند_ق.قدم/ث
	حصان	٠,٧٤٥٧	كيلو وات
١٣-الموصلية الحرارية			
	وحدة حرارية بريطانية/(ساعة.قدم. فهرنهايت)	١,٧٣٠٣	وات/(متر.م°)
١٤-معامل انتقال الحرارة	وحدة حرارية بريطانية/(ساعة.قدم^٢ .فهرنهايت)	٥,٦٧٧	وات/(متر^٢ .م°)
١٥-اللزوجة			
	بويس (Poise)	١	جرام/(سم.ث)
	بويس(Poise)	٢٤١,٩	باوند/(قدم.ساعة)
	بويس(Poise)	٠,٠٦٧١٩٥٥	باوند/(قدم.ث)
	باسكال.ث	١٠	بويس



مطابع جامعة الملك عبدالعزيز



أ.د. مصطفى محمد السيد

هندسة ميكانيكية

- من مواليد مصر
- حصل على شهادة الدكتوراه في الهندسة الميكانيكية من الولايات المتحدة الأمريكية عام ١٩٧٦م.
- عمل أستاذاً بجامعة الملك عبد العزيز و جامعة الكويت (كلية الهندسة)

له ما يزيد على ٩٠ بحثا هندسيا منشورا في مجالات الهندسة الميكانيكية (الهندسة الحرارية).

- مؤلف عدة كتب بالعربية و الانجليزية.
- مؤسس ويعمل حاليا شريك تنفيذي في المجموعة المصرية للاستشارات الهندسية (EGEC).
- moustafa.elsayed@egec-xprt.com



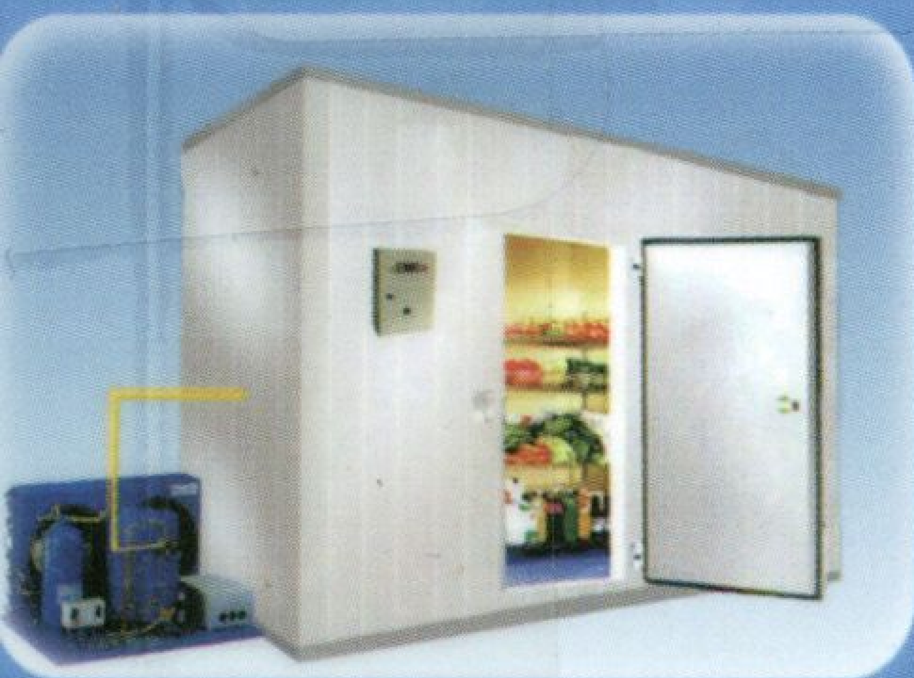
أ.د. عمر محمد علي شتيان الرابغي

هندسة ميكانيكية



- من مواليد السعودية
- حصل على شهادة الدكتوراه في الهندسة الميكانيكية من الولايات المتحدة الأمريكي
- له ما يزيد عن ٣٣ بحثا منشورا في مجالات الهندسة الميكانيكية (الهندسة الحرار
- يعمل أستاذاً بقسم الهندسة الحرارية و تقنية تحلية المياه - جامعة الملك عبد العزيز.
- orabghi@kau.edu.sa

ردمك : ٢ - ٦٠٤ - ٠٦ - ٩٩٦٠ - ٩٧٨









مطابع جامعة الملك عبد العزيز